

EDENILSON ROBERTO DO NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS A PARTIR DE PARÂMETROS
MORFOMÉTRICOS DO RELEVO: REGIÃO METROPOLITANA DE
CURITIBA (RMC)**

CURITIBA
2009

EDENILSON ROBERTO DO NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS A PARTIR DE PARÂMETROS
MORFOMÉTRICOS DO RELEVO: REGIÃO METROPOLITANA DE
CURITIBA (RMC)**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Profº Dr. José Manoel dos Reis Neto

Co-orientador: Dr. Antonio Manuel de Almeida
Rebelo

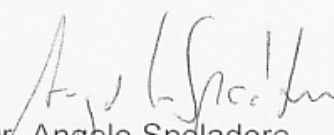
CURITIBA
2009

TERMO DE APROVAÇÃO

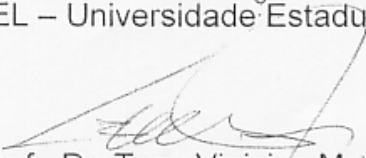
Edenilson Roberto do Nascimento

CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES CÁRSTICAS A PARTIR DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DO RELEVO: REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

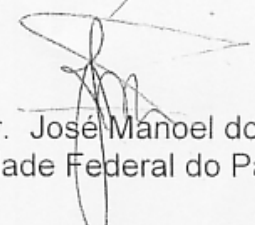
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. A comissão julgadora foi formada por:



Prof. Dr. Angelo Spoladore
UEL – Universidade Estadual de Londrina



Prof. Dr. Tony Vinicius Moreira Sampaio
Universidade Federal do Paraná - UFPR



Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto
Universidade Federal do Paraná - UFPR
Presidente

Curitiba, 25 de junho de 2009.

Agradecimentos

A Deus, pela minha vida, família e pelas pessoas que convivo, sem as quais este trabalho não seria possível.

A minha família, em especial a minha esposa Adriana, que em todos os momentos me apoiou. Aos meus pais Ester e Paulo. Ao meu avô Antonio e a minha avó Olívia, ao meu irmão Anderson e ao meu tio Joel. A eles sou grato, pois estão presentes em tudo o que faço.

Ao Professor José Manoel dos Reis Neto, pela confiança, estímulo e orientação.

Ao Geólogo Doutor Antonio Manuel de Almeida Rebelo, pela co-orientação, paciência e por sempre estar disposto a discutir e incentivar.

Agradeço ao Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná e à PETROBRAS por proporcionarem todas as condições necessárias para a realização deste trabalho.

Aos amigos que fazem ou fizeram parte do LAMIR, em especial ao Professor José Manoel dos Reis Neto e aos amigos Lincoln Oliver Lopes, Salla Talviki Eeva, Célia Sayama, Anelize Manuela Rumbelsperger, Angela Pacheco Lopes, Paula de Carvalho Neves, Rodrigo Secchi, Elisiane Röpper Pescini, Carlos Lara Ribeiro, José Eduardo F. da Costa Gardolinsnki, Clarice Marchese e Evelin Farias, que são o verdadeiro patrimônio do LAMIR.

Aos professores e funcionários do Departamento de Geologia, em especial ao Dr. Luiz Eduardo Mantovani, pela leitura e apontamentos na qualificação. E aos professores Dr. Leonardo José Cordeiro e Dr. Tony Vinícius Moreira Sampaio do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná, que sempre estiveram dispostos a discutir.

Enfim, agradeço as pessoas e instituições que não foram lembradas neste momento, mais de alguma forma fizeram parte deste trabalho.

*Dedicado a minha esposa Adriana e ao meu filho
Paulo Henrique.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 ÁREA ESTUDADA	5
4 MEIOS E MÉTODOS	7
4.1 Dados utilizados	7
4.2 Escalas de análise	7
4.2.1 Escala regional	8
4.2.2 Escala de detalhe – sub-bacias	9
4.3 Elaboração das figuras e obtenção de dados morfométricos	11
4.4 Feições cársticas e evolução do relevo	14
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
5.1 Conhecimento geológico regional	16
5.2 Exploração das rochas carbonáticas	17
5.2.1 Aquífero carste	17
5.2.2 Rochas carbonáticas como minério	19
5.3 Estudos das feições cársticas	21
5.3.1 Fase cartográfica e primeiros estudos geológicos e geomorfológicos	21
5.3.2 Controles geológicos e geomorfológicos – abordagem regional	23
5.4 Processo de carstificação e espeleogênese	25
6 ANÁLISE REGIONAL	29
6.1 Características hipsométricas dos metadolomitos da BAI e da BAR	29
6.1.1 Bacia do Alto Rio Iguaçu (BAI)	29
6.1.2 Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR)	30
6.2 DRENAGENS NOS METADOLOMITOS – ESCALA	33
6.2.1 Bacia do Alto Iguaçu (BAI)	33
6.2.2 Bacia do Alto Ribeira (BAR)	35
6.2.2.1 O Gradiente hidráulico	36
6.2.2.2 A Geologia estrutural	36
6.2.2.3 Existência de níveis de base locais	37
6.2.2.4 O processo de capturas de drenagens	38
6.2.2.5 Características das drenagens nos metadolomitos	38
6.3 DECLIVIDADE DOS METADOLOMITOS – ESCALA REGIONAL	40
6.3.1 Bacia do Alto Iguaçu (BAI)	40
6.3.2 Bacia do Alto Ribeira (BAR)	41

6.4 RUGOSIDADE CONCENTRADA DO RELEVO NOS METADOLOMITOS – ESCALA REGIONAL.....	43
6.4.1 Bacia do Alto Iguaçu (BAI)	43
6.4.2 Bacia do Alto Ribeira (BAR)	44
7 ANÁLISE DAS SUB-BACIAS	47
7.1 Sub-bacia de Tranqueira – Bacia do Alto Rio Iguaçu (BAI).....	47
7.1.1 Geologia	47
7.1.2 Características estruturais	48
7.1.3 Hipsometria	52
7.1.4 Declividade	54
7.1.5 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)	55
7.1.6 Hidrografia	56
7.2 Sub-bacia de Fervida – Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR).....	57
7.2.1 Geologia	57
7.2.2 Características estruturais	58
7.2.3 Hipsometria	63
7.2.4 Declividade	64
7.2.5 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)	66
7.2.6 Hidrografia	68
7.3 Sub-bacia de Bacaetava – Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR).....	69
7.3.1 Geologia	69
7.3.2 Características estruturais	70
7.3.3 Hipsometria	75
7.3.4 Declividade	76
7.3.5 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)	78
7.3.6 Hidrografia	80
8 RESULTADOS	81
8.1 Controles geológicos e relevo	81
8.2 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) e feições cársticas.....	83
8.3 Variável Tempo	87
8.4 Condicionantes superficiais (epigênicos)	90
8.5 Possível atuação hipogênica	91
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	95
9.1 Considerações finais	95
9.2 Recomendações	97
REFERÊNCIAS	99
ANEXO.....	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização e vias de acesso da área estudada.....	6
FIGURA 2 - Contexto regional do sistema de drenagem da área da área estudada.....	10
FIGURA 3 - Localização e hidrografia das sub-bacias estudadas, observar que as mesmas estão na zona limítrofe da Bacia do Alto Iguaçu (BAI) e da Bacia do Alto Ribeira (BAR).	11
FIGURA 4 - Modelo de compartimentação morfoestrutural do Sistema Aquífero Cárstico da RMC. (modificado de LISBOA e BONACIM, 1995).	19
FIGURA 5 - Contexto geológico, hidrográfico e localização das feições endocársticas.	22
FIGURA 6 - Ocorrência das áreas com carstificação correlatas à elaboração das Paleosuperfícies do Puruã, Alto Iguaçu e da abertura do Vale do Rio Ribeira. Baseado em Rebelo <i>et al</i> 2004.	25
FIGURA 7 - Diferentes fases de evolução de espeleogênese e ambientes cársticos. (KLIMCHOUK <i>and</i> FORD, 2000 <i>apud</i> KLIMCHOUK, 2007).	26
FIGURA 8 - Hipsometria dos metadolomitos da BAI e da BAR.	31
FIGURA 9 - Torres e pináculos cársticos. Pedreira da empresa Calfibra localizada na Região de Tranqueira no município de Almirante Tamandaré - PR. Altitude 1080m.	32
FIGURA 10 - Área montanhosa onde ocorrem lentes calcárias próximo à cabeceira do Rio Bacaetava, observar pedreira de calcário.	32
FIGURA 11 - Área plana com presença de lagos. Sub-bacia do Rio Fervida no Município de Colombo - PR.	33
FIGURA 12 - Drenagens e relevo sombreado da BAR e da BAI na região estudada... ..	35
FIGURA 13 - Histograma e TABELA mostrando a percentagem de área em cada intervalos de declividade na bacia hidrográfica do Alto Rio Iguaçu.....	40
FIGURA 14 - Declividade dos metadolomitos da BAI e da BAR.....	42
FIGURA 15 - Histograma e TABELA mostrando a percentagem de área em cada intervalos de declividade na bacia hidrográfica do Alto Rio Ribeira.	43
FIGURA 16 - Relevo acidentado com declividade superior a 30%, em uma das pedreiras localizadas na sub-bacia do Rio Bacaetava, município de Colombo - PR. Observar à esquerda a vertente coberta por vegetação.....	43
FIGURA 17 - Gráfico representando a área por intervalo de rugosidade concentrada na área de ocorrência de metadolomitos da BAI e da BAR.	45
FIGURA 18 - Rugosidade concentrada dos metadolomitos da BAI e da BAR.....	46
FIGURA 19 - Metadolomitos ocorrentes na sub-bacia do Rio Tranqueira.....	48

FIGURA 20 - Geologia da sub-bacia de Tranqueira.	49
FIGURA 21 - Principais estruturas geológicas ocorrentes na sub-bacia de Tranqueira e região.....	50
FIGURA 22 - Seção Geológica da área de estudo. Adaptado de Fiori (1994) <i>apud</i> Bonacim (1996).....	51
FIGURA 23 - Principais Lineações traçadas em fotografias aéreas na escala 1: 25.000 e 1: 70.000 na Sub-bacia de Tranqueira (adaptado de BONACIM, 1996)...	52
FIGURA 24 - Diagrama de rosetas demonstrando os principais lineamentos estruturais da região da Sub-bacia de Tranqueira.	52
FIGURA 25 - Hipsometria e histograma de frequência altimétrica da sub-bacia de Tranqueira.....	53
FIGURA 26 - Declividade e Histograma de área por intervalo de declividade dos metadolomitos da sub-bacia do Rio Tranqueira.	54
FIGURA 27 - Índice de rugosidade concentrada do relevo nos metadolomitos da Sub-bacia de Tranqueira.....	56
FIGURA 28 - Áreas de ocorrência de metadolomitos na sub-bacia de Fervida, limite hidrográfico da BAI e BAR.	58
FIGURA 29 - Geologia da sub-bacia do Rio Fervida.	60
FIGURA 30 - Principais estruturas geológicas da sub-bacia do Rio Fervida.	61
FIGURA 31 - Afloramento de carbonato em fundo de dolina na sub-bacia do Rio Fervida	62
FIGURA 32 - Lineamentos estruturais traçados sobre fotografia aérea na escala 1:30.000 (Fonte: SUDERHSA, 2000)	63
FIGURA 33 - Diagrama de rosetas de lineamentos estruturais positivos e (B) diagrama de rosetas de lineamentos estruturais negativos da região da sub-bacia do Rio Fervida.	63
FIGURA 34 - Hipsometria e histograma de frequência altimétrica da sub-bacia de Fervida.	64
FIGURA 35 - Declividade e histograma de frequência de declividade da sub-bacia do Rio Fervida.....	65
FIGURA 36 - Gráfico e TABELA da percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada da Sub-bacia de Fervida, da BAI e da BAR.....	67
FIGURA 37 - Índice de rugosidade concentrada do relevo da Sub-bacia de Fervida.....	68
FIGURA 38 - Situação hidrográfica da sub-bacia de Bacaetava na zona limítrofe da BAI e da BAR..	70
FIGURA 39 - geologia da sub-bacia do rio Bacaetava.	71
FIGURA 40 - Principais estruturas geológicas presentes na região da sub-bacia do Rio Bacaetava..	73

FIGURA 41 - Diagrama de rosetas demonstrando as direções dos principais lineamentos e alinhamentos estruturais da região da sub-bacia de Bacaetava (Fonte: BAHNIUK, 2007).....	74
FIGURA 42 - A) Foto do dique de direção e mergulho N10W/74SW. B) Traçado esquemático ressaltando alguns aspectos estruturais. Reparar a não continuidade do dique no lado inferior direito da imagem B, sinalizada com ponto de interrogação.....	74
FIGURA 43 - Histogramas de frequência altimétrica: (A) sub-bacia de Bacaetava; (C) baixo curso da sub-bacia de Bacaetava; (D) médio curso da sub-bacia de Bacaetava; e (E) alto curso da sub-bacia de Bacaetava. (B) Perfil de relevo da sub-bacia de Bacaetava.	76
FIGURA 44 - Histogramas de frequência de declividade por área: (A) sub-bacia de Bacaetava; (B) baixo curso da sub-bacia de Bacaetava; (C) médio curso da sub-bacia de Bacaetava; e (D) alto curso da sub-bacia de Bacaetava.	78
FIGURA 45 - Gráfico e TABELA da percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada do relevo da Sub-bacia de Bacaetava, da BAI e da BAR.	79
FIGURA 46 - Rugosidade concentrada do relevo da Sub-bacia de Bacaetava.....	80
FIGURA 47 - Perfil esquemático mostrando a localização das sub-bacias estudadas, o tipo de feições cársticas normalmente ocorrente, e a paleosuperfície correlacionável.	81
FIGURA 48 - Gráfico demonstrando a percentagem de área por intervalo de ICR na BAI e na BAR no intervalo altimétrico de ocorrência da Superfície Alto Iguaçu, e quantidade de feições cársticas ocorrentes em cada intervalo de rugosidade concentrada na BAR.....	85
FIGURA 49 - Gráfico e TABELA da percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada da BAI, da BAR e das sub-bacias estudadas.....	86
FIGURA 50 - Gráficos mostrando a relação entre os valores de ICR e o nível de exposição dos sistemas cársticos nas sub-bacias estudadas.	87
FIGURA 51 - Remanescente geomórfico (<i>Wind-gaps</i>), Reparar a discordância com a vertente e a presença de paleosolo.	89
FIGURA 52 - Poço P-14 com fluxo hídrico ascendente devido ao nível estático superior à superfície do terreno (adaptado de HINDI, 1999).	93
FIGURA 53 - Modelo demonstrando o tipo de exploração mais adequado para o carste das sub-bacias estudadas.	98

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Evolução Geológico/Geomorfológico da Região Sul e Sudeste do Brasil (Adaptado de REBELO <i>et al</i> 2004).	24
QUADRO 2 - Propriedades de drenagem da BAI e da BAR.	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Classes, simbologia, índice e classificação da rugosidade concentrada aplicada na área de ocorrência de metadolomitos.....	13
TABELA 2 - Percentagem de área por intervalo de ICR da BAI.....	44
TABELA 3 - Percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada da BAR.....	45
TABELA 4 - Área por intervalo de declividade dos metadolomitos da sub-bacia de Tranqueira.....	55
TABELA 5 - Percentagem de área por intervalo de ICR da Sub-bacia de Tranqueira.....	55
TABELA 6 - Dados altimétricos das sub-bacias de Tranqueira e Fervida.....	64
TABELA 7 - Intervalos de declividade por área na sub-bacia do Rio Fervida.....	65
TABELA 8 - Porcentagem de área por intervalo de declividade da BAI, BAR e sub-bacia do Rio Fervida.....	66
TABELA 9 - Dados altimétricos das sub-bacias dos rios Tranqueira, Fervida e Bacaetava.....	75
TABELA 10 - Área por intervalo de declividade dos metadolomitos da sub-bacia do Rio Bacaetava.....	77
TABELA 12 - Dados referentes às cavernas ocorrentes na sub-bacia do Rio Bacaetava.....	84

Resumo

As bacias hidrográficas do Alto Rio Iguaçu e do Alto Rio Ribeira na Região Metropolitana de Curitiba limitam dois compartimentos geomorfológicos com diferentes feições cársticas, hospedadas em metadolomitos da Formação Capiru (Grupo Açungui). As feições endocársticas (cavernas e abismos) ocorrem somente na área pertencente à bacia hidrográfica do Rio Ribeira. As feições exocársticas (dolinas, poljes e uvalas) ocorrem nas duas bacias hidrográficas. O principal evento de carstificação regional relacionado a elaboração da Superfície Alto Iguaçu atingiu toda a área e proporcionou um mesmo ambiente geomorfológico até a abertura do Vale do Rio Ribeira, no Mioceno Inferior, marcando um novo ciclo erosivo. A análise morfométrica foi utilizada com o objetivo de determinar as relações existentes entre a evolução geomorfológica e as feições cársticas. Os principais parâmetros morfométricos utilizados foram: do Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) do relevo, declividade e hipsometria, os quais mostraram-se eficientes na caracterização da relação entre a evolução geomorfológica e o nível de exposição dos sistemas cársticos. Foram abordadas duas escalas de análise, a primeira, regional, compreendeu a análise de uma área de 443,4 km², e a segunda e principal, diz respeito à escala de análise local. Nesta escala foram abordadas as sub-bacias hidrográficas de Tranqueira (drenada pela bacia do Alto Rio Iguaçu) e as sub-bacias de Fervida e Bacaetava (drenadas pela bacia do Alto Rio Ribeira). Nas duas escalas observou-se que os sistemas cársticos estão localizados na faixa altimétrica relacionada ao desenvolvimento da Superfície Alto Iguaçu, com mesma idade e desenvolvimento em um único ambiente climático e geológico. Os parâmetros morfométricos analisados, principalmente o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) do relevo, permitem concluir que os diferentes níveis de exposição dos sistemas cársticos estão relacionados à erosão diferenciada dos metadolomitos da Bacia do Alto Ribeira em relação à Bacia do Alto Iguaçu. Tal fato explica a existência de cavernas apenas na área drenada pelo Rio Ribeira em cotas altimétricas semelhantes as “cavernas” encontradas em zona saturada na área drenada pela bacia do Alto Rio Iguaçu. O mesmo fato observa-se na escala de sub-bacias, onde também ocorre maior exposição dos sistemas cársticos nas áreas com relevo mais rugoso. Há, portanto diferentes estágios evolutivos do relevo, aos quais se associam sistemas cársticos característicos. Na bacia do Alto Iguaçu os sistemas cársticos preservam um sistema aquífero em equilíbrio com a paisagem, enquanto na bacia do Alto Ribeira observa-se um a fase de desmantelamento do sistema aquífero, consequência do novo ciclo erosivo vinculado à abertura do Vale do Ribeira.

Palavras-Chave: Feições cársticas, Parâmetros morfométricos, Região Metropolitana de Curitiba

Abstract

The hydrographic basins of the Alto Iguaçu and the Alto Ribeira in the Metropolitan Region of Curitiba limit two geomorphologic compartments with different karst features, hosted in metadolomite of Capiu Formation (Açungui Group). The endokarstic features (caves and abysses) occur only in the area belonging to the Alto Ribeira hydrographic basin. The exokarstic features (dolines, polje and uvalas) occur in the two hydrographic basins. The major regional event of karstification is related to the development of Alto Iguaçu Surface which covered the entire area and provided the same geomorphological setting until the opening of the Ribeira River Valley, in the Lower Miocene, marking a new erosive cycle. Morphometric analysis was used in order to determine the relationship between the geomorphological evolution and karstic features. The main morphometric parameters were: Roughness Concentration Index (RCI), slope and hypsometry, which were effective in characterizing the relationship between the geomorphological evolution and the level of exposure of karstic systems. Two scales of analyses were studied: the first, regional, includes an area of 443,4 km², and the second and main concerns the local scale of analysis. In this scale occur the hydrographic sub-basins of Tranqueira (drained by Iguaçu River) and the sub-basins of Fervida and Bacaetava (drained by Ribeira River). In both scales it is observed that the karstic systems are located in altimetric intervals related to the development of Alto Iguaçu Surface, with the same age and development on a single geological and climatic environment. The morphometric parameters analyzed, mainly the concentrated roughness of relief, allow concluding that different levels of exposure of karstic systems are related to differential erosion in the metadolomites of Alto Ribeira basin compared to those on the Alto Iguaçu basin. The morphometric parameters analyzed, mainly the Roughness Concentration Index (RCI), show that the different levels of exposure of karstic systems are related with differential erosion of metadolomites the hydrographic basin of Alto Ribeira, compared to the basin of Alto Iguaçu. This fact explains the existence of only caves in the area drained by the Ribeira River in altimetric quotas similar to the “caves” found in the saturated zone in the area drained by the basin of the Alto Iguaçu River. The same fact is observed in the scale of sub-basins, where also occurs more exposure of the karstic systems than in areas with more rough relief. Therefore, different evolutionary stages of relief exist, occurring associated to distinct karstic systems. In the Alto Iguaçu River basin, the karstic systems preserve the aquifer system in an equilibrium with the landscape, while in the Alto Ribeira basin there is phases of degeneration of the aquifer system, as a consequence of a new erosive cycle related to the opening of the Ribeira Valley.

Key Words: Karst features, Morfometric parameters, Metropolitan Region of Curitiba

1 INTRODUÇÃO

O amplo caráter exploratório das rochas carbonáticas pode ser limitado ou facilitado em função do tipo de feições cársticas nelas ocorrentes. Áreas com exposição em zona vadosa de cavidades cársticas podem impedir a exploração de calcário, devido a incongruências com as leis ambientais. No entanto, a ocorrência de cavidades em zona saturada, pode torná-las excelentes sistemas aquíferos.

As características geomorfológicas dessas áreas podem contribuir para o entendimento das características geográficas, geológicas e hidrogeológicas de regiões de ocorrência de rochas carbonáticas, o que pode auxiliar na caracterização de áreas onde os metadolomitos podem ser explorados como minério (insumo agrícola, bem mineral para a indústria da construção civil entre outros), ou hospedeira de sistema aquífero e depósitos minerais, considerando a importância da preservação ambiental.

No Brasil, segundo Karmann (1994) cerca de 5 a 7% do território é representado por regiões cársticas. Estas paisagens são estudadas principalmente do ponto de vista morfológico e de suas características geotécnicas e ambientais, sendo sua exploração muitas vezes vinculada somente à destruição do patrimônio espeleológico. Porém, sua exploração é vital para o desenvolvimento de vários setores da economia, principalmente para a indústria de transformação e suprimento de matéria prima para a construção civil. No caso do Estado do Paraná, a exploração de calcário foi responsável em 2003 por cerca 42% do PIB mineral do Estado, representando a principal atividade econômica de diversos municípios da Região Metropolitana de Curitiba (IPARDES, 2003 *apud* REBELO *et al* 2003).

Segundo Ford e Willians (1989), cerca de 12% das áreas continentais secas são ocupadas por rochas carbonáticas, sendo apenas 7 a 10% dessas áreas possuidoras de paisagens cársticas, o que evidencia a não suficiência da existência de rocha solúvel para o desenvolvimento do processo de carstificação, pois, a complexidade deste processo requer o funcionamento sistêmico de diversas variáveis.

Além da abertura de condutos cársticos propiciadas por controles

superficiais epigênicos, também considera-se relevante a existência de controles hipogênicos, propiciadores de abertura de condutos cársticos em profundidade, que segundo Klimchouk (2007), podem ocorrer independentemente da origem do fluído e não ter influência dos controles superficiais epigênicos. Lladó (1970) admite a existência de controles hipogênicos nos processos de carstificação, que por este autor é denominada de “erosão inversa”. Também Ford e Williams (1989) e Palmer (1991), admitem a ação hipogênica, porém vinculada a fluídos ácidos.

As interconexões entre variáveis geológicas, geográficas e climáticas entre outras, é que permite o desenvolvimento do processo de carstificação, o que o torna um fenômeno complexo, que se abordado a partir de variáveis isoladas é parcialmente entendido. Conforme aponta Bonacim (1996), os estudos que visam o entendimento de sistemas cársticos necessitam da aplicação de diversas técnicas, advindas de várias ciências, e muitas vezes do desenvolvimento de técnicas específicas.

Os estudos regionais mais recentes que abordaram os metadolomitos carstificados da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), incluindo a área estudada, concluíram pela predominância de controles geológicos e geomorfológicos nos processos de carstificação, correlatos a três períodos principais de carstificação epigênica (meteórica) entre o Cretáceo e o Mioceno Inferior. No entanto, estes diferentes períodos de carstificação, concomitantes aos episódios de aplainamento e dissecação do relevo regional, originaram diferentes tipos de sistemas cársticos, constituídos por diferentes feições cársticas resultantes de uma ou mais fases ou ciclos de carstificação, dependendo do estágio evolutivo do relevo das bacias hidrográficas em que ocorrem (REBELO *et al*, 2002 e 2007).

Assim, conforme Rebelo *et al* (2007) considera-se que as principais características do relevo regional são o registro de diferentes ciclos erosivos, os quais permitiram o desenvolvimento do carste regional em três fases principais, identificadas em diferentes intervalos altimétricos. Porém, as diferentes dinâmicas erosivas, e as características locais afetaram o relevo e os processos de carstificação no interior das sub-bacias hidrográficas da RMC de forma diferenciada, resultando em diferentes feições cársticas, fato ainda não suficientemente compreendido.

Este trabalho busca com base na análise de fatores geológicos e morfométricos do relevo, relações entre a evolução geomorfológica e a configuração e evolução dos sistemas cársticos em escala de bacias hidrográficas. Como área de estudo foi selecionada a zona limite entre as bacias hidrográficas do Alto Rio Iguaçu e do Alto Rio Ribeira, onde ocorrem metadolomitos pertencentes à Formação Capiru do Grupo Açungui.

As bacias hidrográficas em questão foram selecionadas porque estão situadas em um mesmo contexto evolutivo geológico/geomorfológico e climático e apresentam diferentes feições cársticas. Fato possivelmente derivado da posição geográfica atual, pois se encontram na zona limítrofe de distintos compartimentos geomorfológicos e hidrográficos, existentes nas bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira.

Dentro da área estudada foram selecionadas três sub-bacias hidrográficas, a sub-bacia de Tranqueira localizada na Bacia do Alto Iguaçu e as sub-bacias de Fervida e Bacaetava, localizadas na Bacia hidrográfica do Alto Ribeira, todas com áreas metadolomíticas carstificadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar as relações existentes entre os diferentes tipos de feições cársticas presentes nos carbonatos da Formação Capiuru, do Grupo Açungui e a evolução geomorfológica na escala de sub-bacias, com base nas características geológicas e morfométricas dos metadolomitos ocorrentes nas sub-bacias de Tranqueira, Fervida e Bacaetava na Região Metropolitana de Curitiba (RMC).

2.2 Objetivos específicos

- Identificar os fatores geológicos, hidrográficos e geomorfológicos propiciadores de diferentes feições cársticas na escala de sub-bacias;
- Identificar os fatores indutores do processo de carstificação em sub-bacias na área estudada;
- Auxiliar no estabelecimento de critérios para a exploração dos metadolomitos da Formação Capiuru do Grupo Açungui na RMC.

3 ÁREA ESTUDADA

A área estudada localiza-se na região limítrofe entre as bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira, localizada ao norte do Município de Curitiba, e abrange cerca de 443,45 km² de parte dos territórios dos municípios de Almirante Tamandaré, Bocaiúva do Sul, Colombo, Itaperuçu e Rio Branco do Sul (FIGURA 1).

As principais vias de acesso são as rodovias estaduais PR-092 e a PR-417, que ligam o Município de Curitiba aos municípios de Almirante Tamandaré, Rio Branco do Sul, Colombo e Bocaiúva do Sul.

Do ponto de vista geológico, a região possui litologias pertencentes à Formação Capiçu do Grupo Açungui. Com lentes metadolomíticas com feições cársticas em áreas drenadas pelas bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira, porém com existência de cavernas somente na bacia hidrográfica do Rio Ribeira. Ao sul da área ocorrem, em contato com a Formação Capiçu, as rochas do Complexo Atuba, nas proximidades do município de Curitiba.

A exploração de bens minerais associados aos metadolomitos constitui a principal atividade econômica da região, principalmente como corretivo agrícola e insumo para construção civil. A região também é importante fonte de abastecimento hídrico para parte da Região Metropolitana de Curitiba (RMC).

Os diferentes níveis de exposição superficial dos metadolomitos, bem como a não existência de aquífero cárstico em toda a área de ocorrência desta litologia, condiciona áreas com diferentes vocações exploratórias. Essas vocações estão condicionadas principalmente pelas características geomorfológicas e hidrogeológicas das bacias do Alto Iguaçu e do alto Ribeira na área de estudo.

Enquanto as “pedreiras de calcário” estão localizadas principalmente na área da Bacia do Alto Ribeira (BAR), as áreas explotadas como aquífero estão localizadas predominantemente na Bacia do Alto Iguaçu (BAI).

Segundo o mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná, realizado pela MINEROPAR (2006), a área está contida em três unidades morfoesculturais, denominadas; Planalto de Curitiba, Planalto Dissecado de Tunas do Paraná e

Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul, todas com dissecação variando de média a alta.

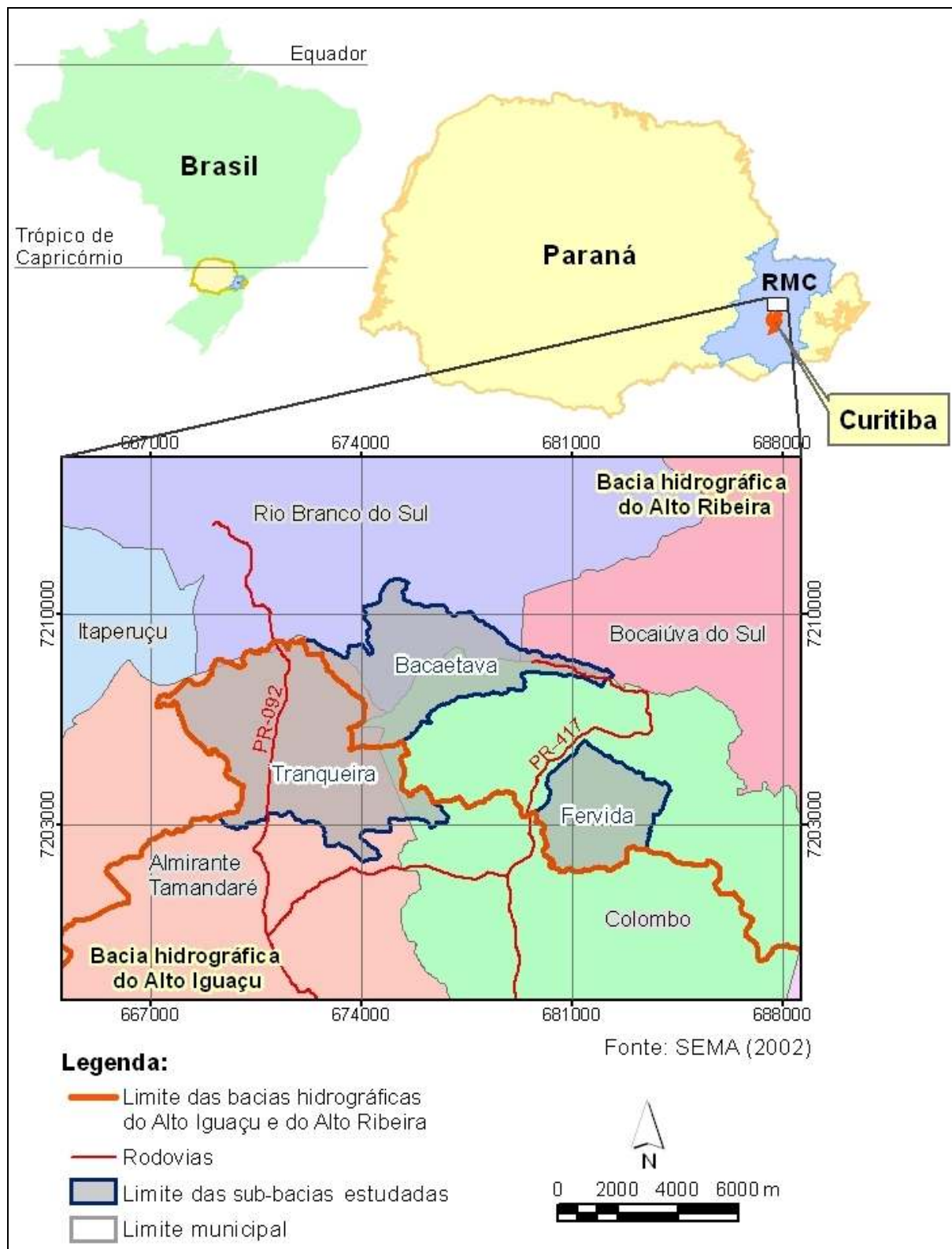


FIGURA 1 - Localização e vias de acesso da área estudada.

4 MEIOS E MÉTODOS

4.1 Dados utilizados

Este trabalho conta com dados derivados de estudos desenvolvidos por instituições governamentais e empresas, merecendo destaque o conjunto de dados disponibilizado pela Companhia de Saneamento do Paraná SA (SANEPAR), que contempla o “Aquífero Carste da Região Metropolitana de Curitiba”. Incluem dados geológicos, topográficos e hidrográficos na escala 1: 25.000, a posição geográfica de feições cársticas superficiais (dolinas, uvalas entre outros), e dados geográficos e descritivos de grande parte dos poços perfurados pela SANEPAR.

Outra fonte de dados, de grande importância para a realização deste trabalho é o Cadastro de Cavidades Naturais do Estado do Paraná, fornecido pelo Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná (GEEP-Açungui 2002). Este cadastro reúne dados altimétricos, de localização e tipologia de feições (cavernas ou abismos) de todas as feições cársticas mapeadas na RMC por este, e por outros grupos espeleológicos que investigaram a região.

As dissertações de mestrado, realizados no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR, em especial os desenvolvidos por Bonacim (1996), Lisboa (1997), Hindi (1999) e Bahniuk (2007), foram a base de estudo das sub-bacias estudadas, principalmente no que diz respeito às características geológicas e hidrogeológicas.

Em campo, foram realizadas visitas, que permitiram a coleta, verificação e calibração dos dados usados na espacialização e correlação dos dados altimétricos, geológicos, de carstificação, hidrográficos, entre outros.

4.2 Escalas de análise

O desenvolvimento deste trabalho incorporou duas escalas de análise: a primeira, regional, compreende a análise geológica e geomorfológica da totalidade

da área de ocorrência de metadolomitos na região estudada, em cuja dimensão foi efetuada a análise e interpretação dos dados hipsométricos, de declividade, de Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) do relevo entre outros, de uma área de 142,22 km². A segunda, de detalhe, e principal, diz respeito à escala de análise local, onde foram analisadas as características geológicas e geomorfológicas dos metadolomitos das sub-bacias hidrográficas de Tranqueira (drenada pela bacia do Alto Rio Iguaçu), e das sub-bacias de Fervida e Bacaetava (drenadas pela bacia do Alto Rio Ribeira).

4.2.1 Escala regional

A localização da área de estudo nos altos cursos das bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira motivou a utilização das abreviaturas BAI (Bacia do Alto Iguaçu) e BAR (Bacia do Alto Ribeira) para referência às porções pertencentes às respectivas bacias hidrográficas.

A abordagem regional buscou a caracterização do relevo existente na Bacia do Alto Rio Iguaçu (BAI) e da Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR), e foi motivada pela ocorrência de relevos e feições cársticas diferentes entre estas bacias hidrográficas.

Visto a existência de um contexto geológico similar, buscou-se através da análise das características morfométricas (hipsometria, declividade, rugosidade concentrada) e de drenagens, entre outras, o entendimento da ocorrência de diferentes tipologias de feições cársticas na BAI e na BAR.

Merece destaque a localização das sub-bacias em estudo na zona limítrofe das bacias hidrográficas dos altos cursos dos rios Iguaçu e Ribeira (FIGURA 2), fato que proporciona ao carste da RMC a exposição a diferentes dinâmicas erosivas.

O caráter endorréico da Bacia do Rio Iguaçu, pertencente às bacias dos rios Paraná e La Plata, condiciona um curso somente em território paranaense de cerca de 1320 km, atravessando praticamente todo o Estado do Paraná, segundo dados da Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Paraná (SEMA). Suas nascentes localizam-se na Serra do Mar em altitudes superiores a 1050m, e sua foz, no Rio Paraná, na cota altimétrica próxima de 100m, o que proporciona um gradiente

hidráulico de cerca de 0,7m/km. Já o sistema hidrográfico do Ribeira desde suas nascentes localizadas a norte de Curitiba em cotas semelhantes às nascentes do Rio Iguaçu, até o Oceano Atlântico estende-se por cerca de 350 km, e possui um gradiente hidráulico de aproximadamente 3m/km, cerca 4,5 vezes superior ao encontrado no Rio Iguaçu.

A FIGURA 2 apresenta a hipsometria e o curso do Rio Iguaçu em território paranaense, e do Rio Ribeira até sua foz no litoral do Estado de São Paulo.

4.2.2 Escala de detalhe – sub-bacias

Esta escala representa a principal análise deste estudo, onde buscou-se entender os principais controles geomorfológicos responsáveis pelas diferentes feições cársticas, presentes nas três sub-bacias hidrográficas selecionadas. Os atributos geológicos e geomorfológicos utilizados na seleção das sub-bacias estudadas são:

- Posição geográfica na zona limítrofe dos compartimentos geomorfológicos e hidrográficos, drenados pelos rios Iguaçu e Ribeira (FIGURA 3);
- Contexto geológico similar (rochas pertencentes ao Grupo Açungui e Formação Serra Geral);
- Presença de diferentes tipos de feições cársticas, endocársticas (cavernas) e exocársticas (dolinas, poljes, uvalas entre outros), com diferentes graus de exposição;
- Importante área de exploração de rochas carbonáticas: como minério e hospedeira do sistema aquífero cárstico da RMC.

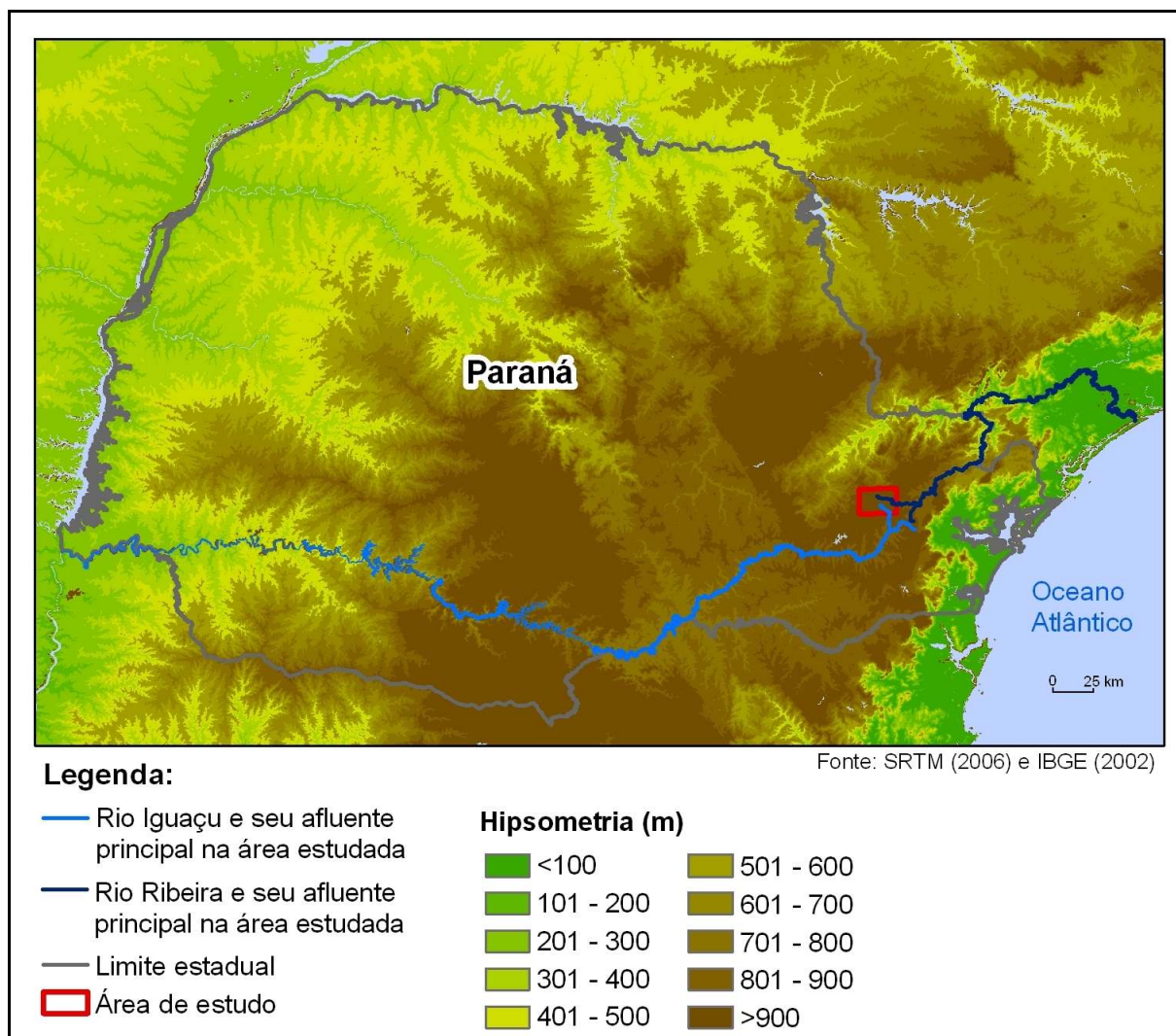


FIGURA 2 - Contexto regional do sistema de drenagem da área da área estudada.

Localmente o carste da sub-bacia de Tranqueira é drenado pelo Rio Barigui, um dos principais rios da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Iguaçu, que nasce na Serra da Betara em altitudes de aproximadamente 1100m, e sua foz na cota altimétrica 870m. Os 60 km percorridos entre a Serra da Betara e o Rio Iguaçu gera um gradiente hidráulico de cerca de 3,8m/km.

Já os carstes presente nas sub-bacias de Bacaetava e Fervida são drenados pelo Rio Capivari, afluente do Rio Ribeira. As nascentes do Rio Capivari na sub-bacia de Bacaetava também estão em cotas altimétricas em torno de 1100m, porém em comparação com o Rio Barigui, observa-se um gradiente hidráulico 55% maior nos primeiros 60 km, com cerca de 7m/km.

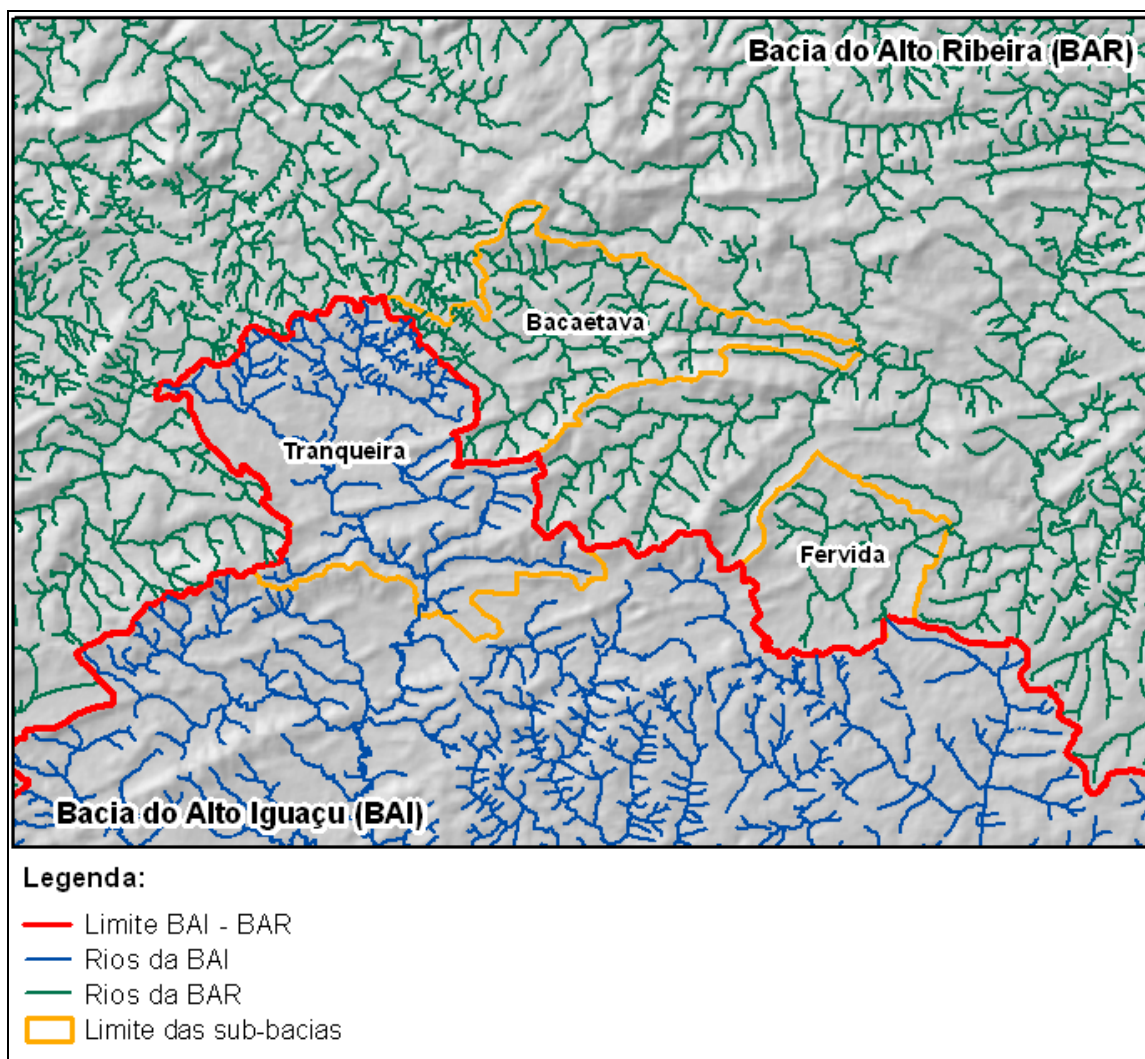


FIGURA 3 - Localização e hidrografia das sub-bacias estudadas, observar que as mesmas estão na zona limítrofe da Bacia do Alto Iguaçu (BAI) e da Bacia do Alto Ribeira (BAR).

4.3 Elaboração das figuras e obtenção de dados morfométricos

A elaboração das figuras, histogramas e obtenção dos dados alfa numéricos da região estudada, nas duas escalas abordadas, tiveram como base os dados na escala 1:25.000, disponibilizados pela SANEPAR. Originalmente estes se encontravam na estrutura vetorial, com curvas de nível com intervalo de 5 metros, sendo os mesmos inseridos no *software* ArcGis 8.3, e foram utilizadas para a elaboração de dados no formato *raster* com *pixel* 30x30m, que serviam de base para confecção das figuras de hipsometria, declividade, rugosidade concentrada e relevo sombreado.

O mapeamento geológico também contou com dados na escala 1:25.000, fornecidos pela SANEPAR. Porém, estes dados abrangem somente a região de ocorrência do Aquífero Carste da RMC, sendo que algumas áreas na escala regional contaram com dados fornecidos pela MINEROPAR (Minerais do Paraná S.A.) na escala 1:250.000.

Para o mapeamento, análise e comparação das características hipsométricas da BAI e da BAR e das sub-bacias, foi realizada a distribuição de intervalos altimétricos a cada 25m, a partir dos quais foram gerados histogramas de frequência altimétrica separados para cada bacia e sub-bacia. Ou seja, foram confeccionadas figuras e histogramas para a representação da área de ocorrência dos metadolomitos da BAI e da BAR. Com esta figura, foi possível observar as faixas altimétricas mais frequentes, que representam as superfícies mais aplainadas (RIFFEL, 2005), bem como faixas menos frequentes, onde há um relevo geralmente mais dissecado.

As figuras de declividade, a exemplo da figura de hipsometria, foram confeccionados com a distribuição de intervalos e histograma de frequência separados para as escalas de análise. Além da representação gráfica, foram calculadas com base na metodologia proposta por De Biasi (1991), as áreas de cada intervalo de declividade, bem como sua representação percentual em cada bacia hidrográfica.

Também, foram analisadas outras características físicas que auxiliam no entendimento da diferenciação da BAI e da BAR, principalmente as relacionadas à hidrografia e aos controles proporcionados pelas estruturas tectônicas, os quais demandaram a confecção de figuras e correlação de diversos dados de trabalhos precedentes a este.

Visando quantificar as características do relevo da área estudada, optou-se pelo cálculo do Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) proposto por Sampaio (2008), que se baseia no índice de rugosidade de Hobson (1972), o qual compara a medida de área real com a medida de área plana.






O índice de rugosidade de Hobson (1972) resulta em um *grid* de células dimensionadas pela escala da grade da figura, apresentando um valor único de rugosidade para cada célula (*pixel*) do mapa com de 10m,

por exemplo, há um índice intrínseco aos 100m² de área analisada, sem relação alguma com as células vizinhas (SAMPAIO, 2008).

Objetivando eliminar o inconveniente da classificação pontual do relevo, porém baseado em valores similares ao proposto por Hobson (1972), Sampaio (2008) propõe o uso do estimador por Kernel (*Kernel estimation*), que permite a análise da dispersão ou concentração espacial de processos espaciais de primeira ordem (fenômenos pontuais) no espaço.

Tal procedimento consiste basicamente na transformação do *grid* (ponto representados por “*pixels*” que possuem um valor de declividade), para um arquivo de pontos amostrais transformados em valores de rugosidade, e por último a aplicação do estimador por Kernel ponderado. A discretização a partir do uso de percentis, foi utilizada para evitar a formação de classes de valores vazias ou super/sub dimensionadas espacialmente, em decorrência da formação de classes com amplitude de dados ou elementos desproporcionais aos demais (SAMPAIO, 2008). Foram obtidas cinco classes representativas de rugosidade concentrada do relevo, com índice (número abstrato que indica a variação da rugosidade concentrada), variando entre 1.607 a 41.853 (TABELA 1)

TABELA 1 - Classes, simbologia, índice e classificação da rugosidade concentrada aplicada na área de ocorrência de metadolomitos.

Classes	Simbologia	Índice	Classificação
1		1.607 - 9.340	Rugosidade muito baixa
2		9.340 - 12.181	Rugosidade baixa
3		12.181 - 14.549	Rugosidade média
4		14.549 - 17.548	Rugosidade alta
5		17.548 - 41.853	Rugosidade muito alta

Para a aplicação do estimador por Kernel e discretização igualitária do índice de concentração da rugosidade (ICR) dos metadolomitos ocorrentes na área de estudo, foram analisadas conjuntamente as áreas de ocorrência de metadolomitos das bacias hidrográficas do Alto Iguaçu e do Alto Ribeira. Posteriormente à aplicação do Kernel, e a discretização dos valores obtidos, foram individualizadas as áreas da BAI e da BAR, afim de possibilitar a comparação entre ambas.

Ainda, foram realizadas visitas a campo, que permitiram a coleta de dados

que foram utilizados nas interpretações realizadas a partir do geoprocessamento de dados geológicos, altimétricos, hidrográficos entre outros.

4.4 Feições cársticas e evolução do relevo

Com base em Rebelo *et al.* (2007), considera-se que a relação entre diferentes padrões de relevo e o estágio evolutivo dos sistemas cársticos é traduzida na paisagem pela ocorrência de diferentes formas cársticas. Ou seja, carstes correlatos a um mesmo evento de carstificação, portanto de mesma idade, podem possuir, conforme as características geomorfológicas locais, diferentes tipos de feições cársticas.

Partindo-se desta premissa é necessário dividir os tipos de ocorrência das formas cársticas presentes na área de estudo, que se distinguem entre formas **exocársticas**, ou superficiais, e formas **endocársticas**, ou subterrâneas. As feições exocársticas são representadas principalmente por: dolinas, uvalas, poljes, sumidouros, lapiás, vales cegos, já as formas endocársticas são melhores representadas por cavernas e abismos (FLÜGEL, 2004).

Já Klimchouk (2007) ao abordar a carstificação a partir de uma perspectiva hidrogeológica e morfogenética, considera a existência de processos hipogênicos na abertura de cavidades cársticas, independente da origem, composição química e temperatura dos fluídos. Ou seja, muitas cavidades existentes em subsuperfície, e superfície podem ter origem intrinsecamente ligada a fluídos de qualquer natureza que por artesianismo e/ou confinamento possuem energia suficiente para ascender e proporcionar carstificação em profundidade, sem possuir relação alguma com os controles superficiais.

Este último autor admite, além do confinamento, também o artesianismo como propiciador de carstificação hipogênica, denominada por Lladó (1970) de “erosão inversa”. Ambos concordam ao admitirem a tendência natural de desaparecimento da carstificação hipogênica devido à comunicação com ambientes de desenvolvimento de carstes epigênicos (meteóricos). Klimchouk (2007) reforça esta teoria ao descrever a coexistência de feições cársticas, inicialmente de natureza exclusivamente hipogênica, que devido à evolução do relevo deixaram de

possuir fluxo ascendente derivado de sua natureza pretérita confinada, semiconfinada ou artesianas, passando a possuir controles essencialmente superficiais.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos existentes, que abordam os metadolomitos carstificados e não carstificados ocorrentes na Região Metropolitana de Curitiba (RMC) que se somam no entendimento da paisagem e do sistema hidrogeológico regional.

O primeiro desenvolvido com maior ênfase a partir da segunda metade do século XX até a atualidade, não aborda explicitamente o fenômeno de carstificação, porém serve como base para todos os estudos posteriores e diz respeito aos estudos que possibilitaram o conhecimento geológico regional.

O segundo enfoca principalmente as características hidrogeológicas e a viabilidade geotécnica e ambiental na exploração do Aquífero Carste da RMC, e foi desenvolvido com maior ênfase na década de 90 e nos dois primeiros anos do século XXI.

Já o terceiro, motivado pelo pouco conhecimento científico e tecnológico dos metadolomitos, aborda a importância e viabilidade dos metadolomitos como minério, e foram desenvolvidos principalmente a partir do fim da década de 90 até 2005.

O último enfoque refere-se ao estudo da espeleogênese e das feições cársticas da RMC, que apesar de serem descritas desde o início do século XIX, começaram a ser estudadas com maior ênfase somente a partir da segunda metade do século XX.

5.1 Conhecimento geológico regional

Os estudos visando a caracterização mineral e o entendimento da evolução geológica da região de ocorrência dos metadolomitos no leste paranaense começaram a ser realizados no fim do século XIX com Derby (1878) e Oliveira (1927), sendo que Derby (1878) foi quem primeiro utilizou a denominação “Série Açungui” para se referir ao conjunto de rochas metamórficas da porção leste do Estado do Paraná (BIGARELLA *et al* (1967) *apud* CANALI 1980). Porém, é a partir da segunda metade do Século XX, com os trabalhos de Bigarella (1953) e Bigarella

e Salamuni (1956), que esses estudos passaram a ser realizados com maior ênfase.

Os trabalhos realizados a partir da década de 50 aumentaram quantitativamente e qualitativamente o conhecimento dos litotipos da região leste do Paraná. Neste contexto merecem destaque os trabalhos de Bigarella e Salamuni (1967), Leprevost (1967), Marini (1970), Ebert (1971), Fuck *et al* (1971), Popp (1980), Soares e Reis Neto (1987), Fiori (1984, 1990, 1992 e 1994), Fassbinder (1996) entre outros, que aumentaram o conhecimento do Grupo Açungui, e consequentemente o entendimento dos metadolomitos nele ocorrente.

5.2 Exploração das rochas carbonáticas

5.2.1 Aquífero Carste

A partir da década de 90, além dos trabalhos supracitados iniciaram-se os trabalhos de cunho hidrogeológico, motivados pela exploração de água no Aquífero Carste através de poços tubulares perfurados pela SANEPAR. A complexidade do sistema aquífero e os problemas geotécnicos agravados neste período motivaram estudos tanto de empresas e instituições nacionais e internacionais.

Destacam-se neste contexto os trabalhos de Bonacim (1996), Lisboa (1997) e Hindi (1999), realizados no âmbito do programa de Pós-graduação em Geologia da UFPR, que tiveram os seguintes objetivos:

1. Caracterizar o mecanismo de funcionamento do sistema hidrogeológico cárstico desenvolvido nos metadolomitos Proterozóicos da Faixa Capiu (Grupo Açungui);
2. Definir as características hidrogeológicas do compartimento São Miguel presente no Aquífero Carste;
3. Cadastrar, classificar e caracterizar as fontes cársticas das bacias dos rios Fervida, Tumiri, Água Comprida e Onças, em função de suas propriedades hidrogeológicas e hidroquímicas.

Todos estes trabalhos foram desenvolvidos em parcerias com instituições como a antiga Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente - SUREHMA, hoje denominada Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERSHA), Companhia de Saneamento do Paraná SA (SANEPAR), no Laboratório de Pesquisa Hidrogeológicas da UFPR entre outras, além de em alguns casos contarem com convênios internacionais como o *Japan International Cooperation Agency* -JICA (1995) e o convênio firmado com o instituto *Johaneum Research* da Áustria (1996).

Lisboa e Bonacim (1995), antes da realização de seus trabalhos no âmbito do programa de Pós-graduação em Geologia, descreveram o contexto morfoestrutural compartimentado do Aquífero Carste da RMC. Contexto este delineado por um padrão geométrico losangular, onde se verificam massas metadolomíticas carstificadas limitadas por fronteiras praticamente impermeáveis (cristas de filito e quartzitos entrecortadas por diques de diabásio), com comportamento hidráulico independente (FIGURA 4).

O fluxo hídrico resultante desta configuração, conforme estes autores, assemelha-se a uma série de "tanques" (também descritas como células cársticas), interligados entre si por vertedouros de topo através das drenagens que ultrapassam as barreiras hidrogeológicas dadas pelos diques de diabásio e cristas de filito.

O estudo para viabilização da exploração do aquífero cárstico solicitado pela SANEPAR em 2001, desenvolvido no Município de Colombo - PR na sub-bacia do Rio Fervida aponta para a existência de fluxos hídricos subterrâneo entre estas células, ou seja, as barreiras impostas pelos diques de diabásio e as demais litologias não carstificadas seriam uma zona de barramento do fluxo hídrico (semiconfinado), eficaz somente na zona do epicarste existente em cada célula cárstica, já o fluxo profundo seria apenas retardado, e as células cársticas funcionariam todas como área de recarga do endocarste onde funcionaria o aquífero carste.

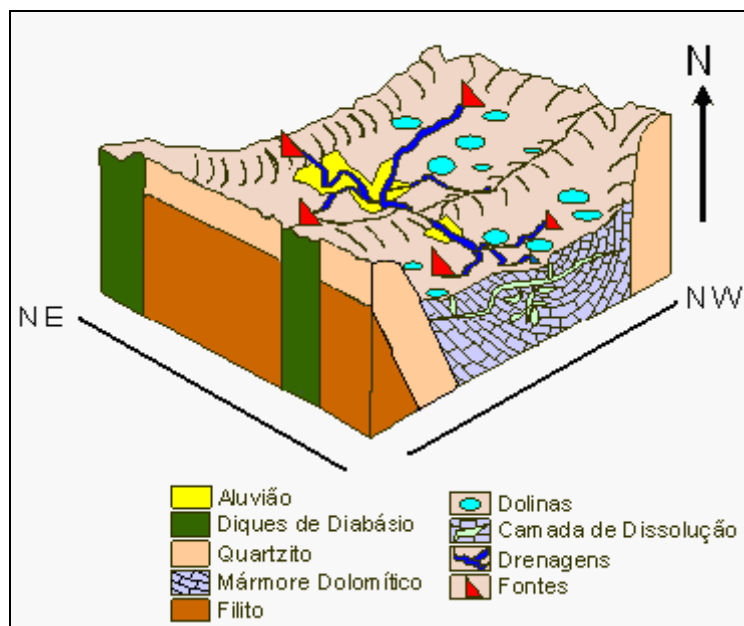


FIGURA 4 - Modelo de compartimentação morfoestrutural do Sistema Aquífero Cárstico da RMC. (modificado de LISBOA e BONACIM, 1995).

Já o relatório conclusivo do Projeto Carste, desenvolvido num contexto de cooperação entre a UFPR, SANEPAR, SUDERSHA e o *Johaneum Research* da Áustria, publicado em 2002, reafirma alguns pontos descritos por Lisboa e Bonacim (1995), e apresenta novas descobertas sobre o funcionamento deste Aquífero. As conclusões deste trabalho confirmam a vocação dos diques de diabásio como barreiras impermeáveis, e vinculam o contato dos metadolomitos com os diques como zonas de ocorrência de acentuada carstificação, admitindo a compartimentação deste aquífero em células cársticas independentes. Já os filitos, na descrição de Lisboa e Bonacim (1995), tidos como barreiras hidrogeológicas impermeáveis são descritos como zona permeável.

5.2.2 Rochas carbonáticas como minério

Os metadolomitos ocorrentes na RMC além de hospedarem o aquífero cárstico possuem características geoquímicas e mineralógicas que permitem em algumas regiões caracterizá-los como minério. Guimarães (2005), ao estudar a viabilidade do “calcário como minério na Formação Capiú”, sintetiza a importância da exploração deste litotipo para a economia da RMC.

A Região Metropolitana de Curitiba é constituída por 26 municípios, dos quais 35% possuem como principal fonte de renda e emprego as atividades relacionadas à extração de “calcário” com alto teor de magnésio. A economia dos municípios de Rio Branco do Sul, Colombo, Almirante Tamandaré e Cerro Azul é sustentada pela extração e transformação deste litotipo, principalmente para o uso como corretivo agrícola e cal para a construção civil. Avalia-se atualmente, que só na RMC cerca de 6.500 famílias (IPARDES, 2003) dependam, direta ou indiretamente, da pesquisa, exploração, exploração, beneficiamento, transformação e venda deste bem mineral (GUIMARÃES, 2005. p. 1 e 2).

A importância econômica, somada à necessidade de melhor conhecer o minério explorado, motivou estudos na região de ocorrência da Formação Capiru, como os de Siqueira (2001), que visou estabelecer critérios de exploração para os metadolomitos ocorrentes na Região do Município de Colombo, e o de Adam (2004) que abordou as características geológicas e tecnológicas dos mármore da região do Tigre no Município de Bocaiúva do Sul.

Todos estes trabalhos foram desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFPR, apoiados pelo projeto Distritos Mineiros de Calcário do Paraná (DIMICAL) desenvolvido no Departamento de geologia da UFPR, finalizado em 2005. Este projeto teve como principal objetivo a integração, análise e ampliação dos estudos científicos sobre os metadolomitos da RMC, de maneira a englobar os dados geológicos, econômicos e ambientais.

Rebelo *et al.* (2003), também ressalta a importância econômica da exploração de calcário na RMC, e destaca o fato de esta atividade ser responsável por cerca de 42% do PIB mineral do Estado, segundo a Minerais do Paraná SA (MINEROPAR). Neste trabalho, a exemplo dos trabalhos supracitados, o incipiente conhecimento científico e tecnológico dos metadolomitos são destacados, porém, também os entraves de ordem organizacional, ambiental e de disputas de territórios com outros tipos de ocupação são apontados como fatores limitadores a esta atividade.

Além do âmbito acadêmico, outros esforços objetivando melhorar o conhecimento dos metadolomitos da região foram efetuados no final da década de 90, destacando-se os programas: PRODECAL (1997) - Programa de desenvolvimento da indústria do calcário e da cal no Estado do Paraná, o Projeto PIMA/PR (1997) - Programa de Avaliação Geológico-Econômica dos Insumos Minerais para Agricultura no Paraná.

Também em 1997, destacam-se, os estudos detalhados sobre áreas selecionadas, direcionado a mineradores e administradores regionais com informação básica necessária à modernização da indústria do calcário paranaense, realizados pela MINEROPAR que, segundo Guimarães (2005), geraram o conhecimento mais completo e consistente da área de ocorrência dos metadolomitos no Paraná.

5.3 Estudos das feições cársticas

5.3.1 Fase cartográfica e primeiros estudos geológicos e geomorfológicos

As primeiras referências à cavidades nos metadolomitos da RMC remontam ao início do século XIX, porém somente a partir da década de 60 do século XX, com a criação de grupos espeleológicos, inicia-se o levantamento sistemático da localização geográfica e das características morfológicas das cavernas da região. Destaca-se o Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná GEEP - Açungui, criado em meados da década de 80, responsável pelo cadastramento de grande parte das cavidades cársticas hoje conhecidas, além da melhoria dos dados referentes às cavernas cadastradas antes de sua criação (SESSEGOLO, 2006).

Os levantamentos das feições endocársticas em zona vadosa (cavernas - desenvolvimento predominante horizontal, e abismos - desenvolvimento predominante vertical), contemplam somente o carste existente na Bacia do Alto Ribeira (BAR), onde estas feições ocorrem. Já o carste ocorrente na Bacia do Alto Iguaçu (BAI) apresenta-se com uma configuração diferenciada, normalmente com feições exócarsticas (dolinas, uvalas, poljes entre outras) e endocársticas em zona saturada. Os trabalhos de Silva (1991) e Silva e Oka-Fiori (1996), destacam-se no mapeamento e estudos das feições exocársticas na Bacia do Alto Iguaçu, sendo uns dos primeiros estudos a localizar, mapear e analisar do ponto de vista geomorfológico, hidrográfico e litoestrutural estas feições.

Os trabalhos de Bonacim (1996) e Polidoro (2005), entre outros, que estudaram compartimentos cársticos e sub-bacias nesta região também contribuíram para o levantamento geográfico e entendimento da disposição e ocorrência de

dolinas, poljes e uvalas na BAI. Já o endocarste em zona saturada presente na BAI é identificado somente na descrição dos perfis geológicos de poços perfurados pela SANEPAR. A FIGURA 5 apresenta o contexto geológico e as feições endocársticas ocorrentes na área das sub-bacias.

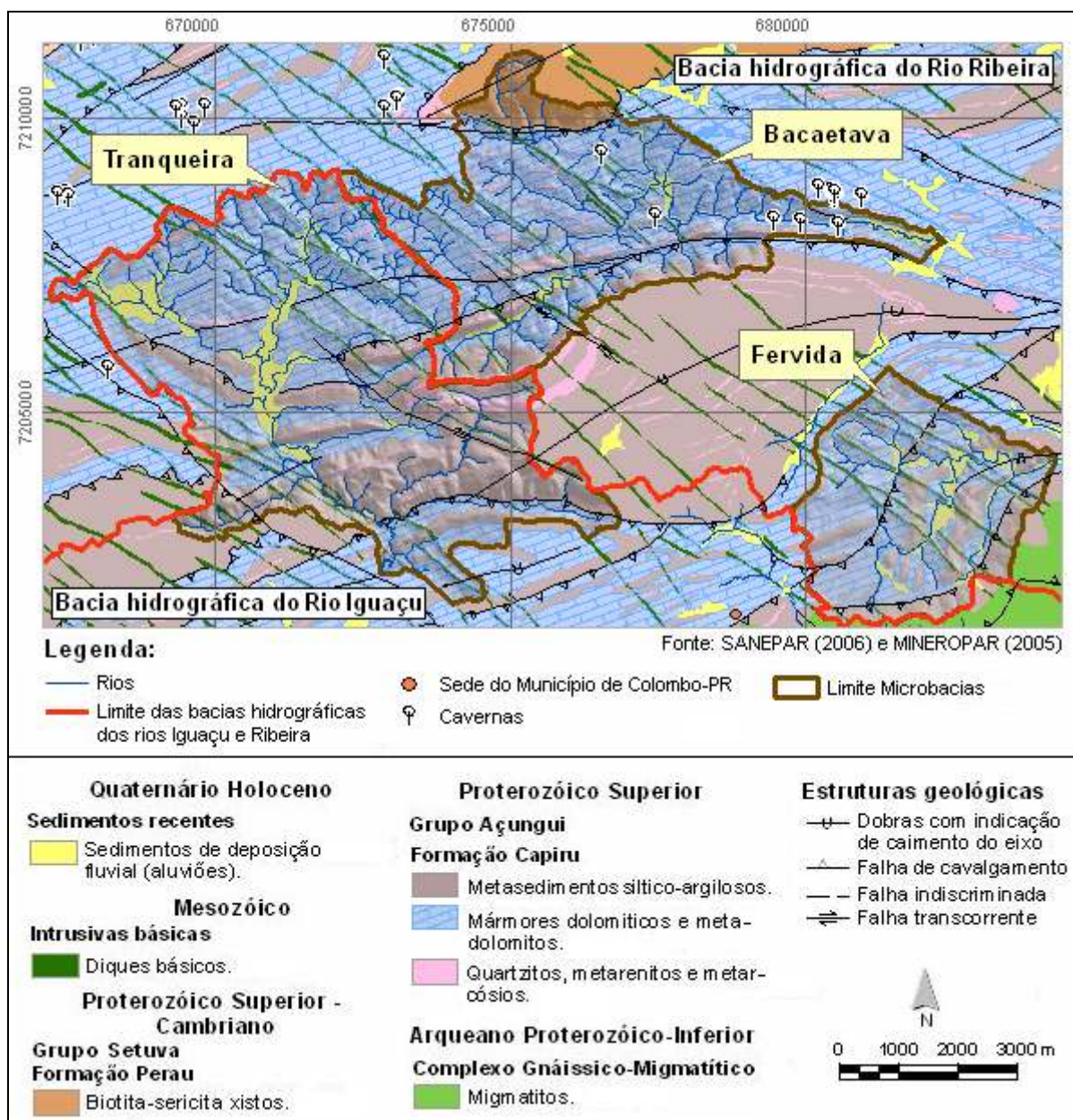


FIGURA 5 - Contexto geológico, hidrográfico e localização das feições endocársticas.

5.3.2 Controles geológicos e geomorfológicos – abordagem regional

Os estudos realizados durante o desenvolvimento do projeto DIMICAL (2001-2005), desenvolvido no Departamento de Geologia da UFPR, aponta para a existência de controles geológicos e geomorfológicos na existência de diferentes feições cársticas e evidencia a existência de relações entre as superfícies regionais de aplainamento e o agrupamento das feições cársticas. Destacam-se neste período os trabalhos publicados por Rebelo *et al* (2002 e 2004).

O QUADRO 1, elaborado por Rebelo *et al* (2004), sintetiza a evolução Geológica/Geomorfológica do leste Paranaense a partir do período Jurássico Superior, e enfoca o surgimento das Superfícies de Purunã e Alto Iguaçu, e a abertura do vale do Ribeira que permitiu o truncamento dessas Superfícies.

A Superfície de Aplainamento do Purunã desenvolvida entre fim do período Cretáceo e o início do Paleógeno apresenta feições cársticas comumente em cotas superiores a 1035m de altitude, que na área de estudo encontram-se principalmente nas cabeceiras das sub-bacias de Tranqueira e Bacaetava. Já as feições associadas à elaboração da Superfície de Aplainamento do Alto Iguaçu, desenvolvida entre o Oligoceno e o Mioceno Inferior, estão comumente entre as cotas altimétricas 945 e 1035m.

Na FIGURA 6, as áreas de ocorrência dos metadolomitos estão representadas segundo a faixa altimétrica de ocorrência de cada Superfície de aplainamento. Como pode ser observado, há a predominância da faixa altimétrica de ocorrência da Superfície Alto Iguaçu, seguida da área de ocorrência da faixa altimétrica da Superfície do Purunã e pequenas áreas de truncamento da Superfície Alto Iguaçu pela erosão atuante na Bacia do Rio Ribeira.

QUADRO 1 - Evolução Geológico/Geomorfológico da Região Sul e Sudeste do Brasil (Adaptado de REBELO *et al* 2004).

Evolução Geológico/Geomorfológica da Região Sul e Sudeste do Brasil a partir do Jurássico Superior (baseado em Ab' Saber e Bigarella 1961, Pereira e Macedo 1990, Almeida e CARNEIRO 1998, ALMEIDA *et al.* 2000, MOHRIAK 2004, RICCOMINI *et al.* 2004, ZALÁN 2004; FRANCO *et al.* 2005, GODOY *et al.* 2005 e HACKSPACHER 2005).

CENOZÓICO (65 Ma - Recente)

Paleógeno/Neógeno (33,7 - 5,3 Ma)

Oligoceno – Mioceno (33,7 - 5,3 Ma)

- Abertura do **Vale do Ribeira** no Mioceno Inferior (?)
- Magmatismo alcalino no Mioceno
- Recuo erosivo da SM
- **Superfície do Alto Iguaçu** no Paraná (Oligoceno/Mioceno Inferior)

Paleógeno (65 - 23,5 Ma)

Paleoceno – Eoceno (65 - 33,7 Ma)

- Ascensão epirogênica condicionando vários ciclos erosivos.
- Principal fase de desenvolvimento do RCSB⁵ no Eoceno
- Formação de bacias tafrogênicas e desenvolvimento da plataforma continental
- Magmatismo alcalino no Eoceno
- Na BS evento tectônico causa discordância entre sequências deposicionais *maastrichtiana* e *paleocena*
- Surgimento da Falha de Santos no Paleoceno, origem da primitiva SM
- Início de evento tectônico no Paleoceno com flexuras e falhamentos (novos e reativados), que deformou a Superfície Japi/Purunã, levando a desnivelamentos do Planalto Atlântico

MESOZÓICO (250 - 65 Ma)

Cretáceo Superior (96 - 65 Ma)

Senoniano (88 - 65 Ma)

- Surgimento da **Superfície do Purunã** no Paraná (Japi em São Paulo e Rio de Janeiro), entre o final do Senoniano e início do Paleoceno
- Ciclo erosivo Sul – Americano, com deposição nas BS e BSP
- Calma tectônica
- Intrusões basálticas na BS e alcalinas na região costeira e plataforma rasa
- Continuação do soerguimento pulsativo e subsidência da BS

Turoniano (92 - 88 Ma)

- Início dos processos de levantamento da SM⁴
- Clímax de transgressão marinha na BS (discordância entre o Neo e o Eoturoniano ?)
- Soerguimento pulsativo da área oeste da BS
- Período de magmatismo alcalino intenso
- Importante evento tectônico com magmatismo associado

Cretáceo Inferior (135 - 96 Ma)

- Preenchimento inicial da BS com sedimentos e basaltos correlatos à Fm. Botucatu da BSP³
- Fase rifte da BS²
- Antigas falhas do embasamento¹ ganham características lístricas
- Primeiros processos extensionais

Jurássico Superior (154 - 135 Ma)

- Fase inicial da abertura do Oceano Atlântico
- Processos tectônicos e magmatismo basáltico e alcalino
- Início da Reativação Wealdeniana devido à separação dos continentes

Notas: 1. A estruturação brasileira “guiou” o modelado do relevo na região do Açungui/Ribeira; 2. BS - Bacia de Santos; 3. BSP - Bacia Sedimentar do Paraná; 4. SM - Serra do Mar; 5. RCSB - Rifte Continental do Sudeste do Brasil.

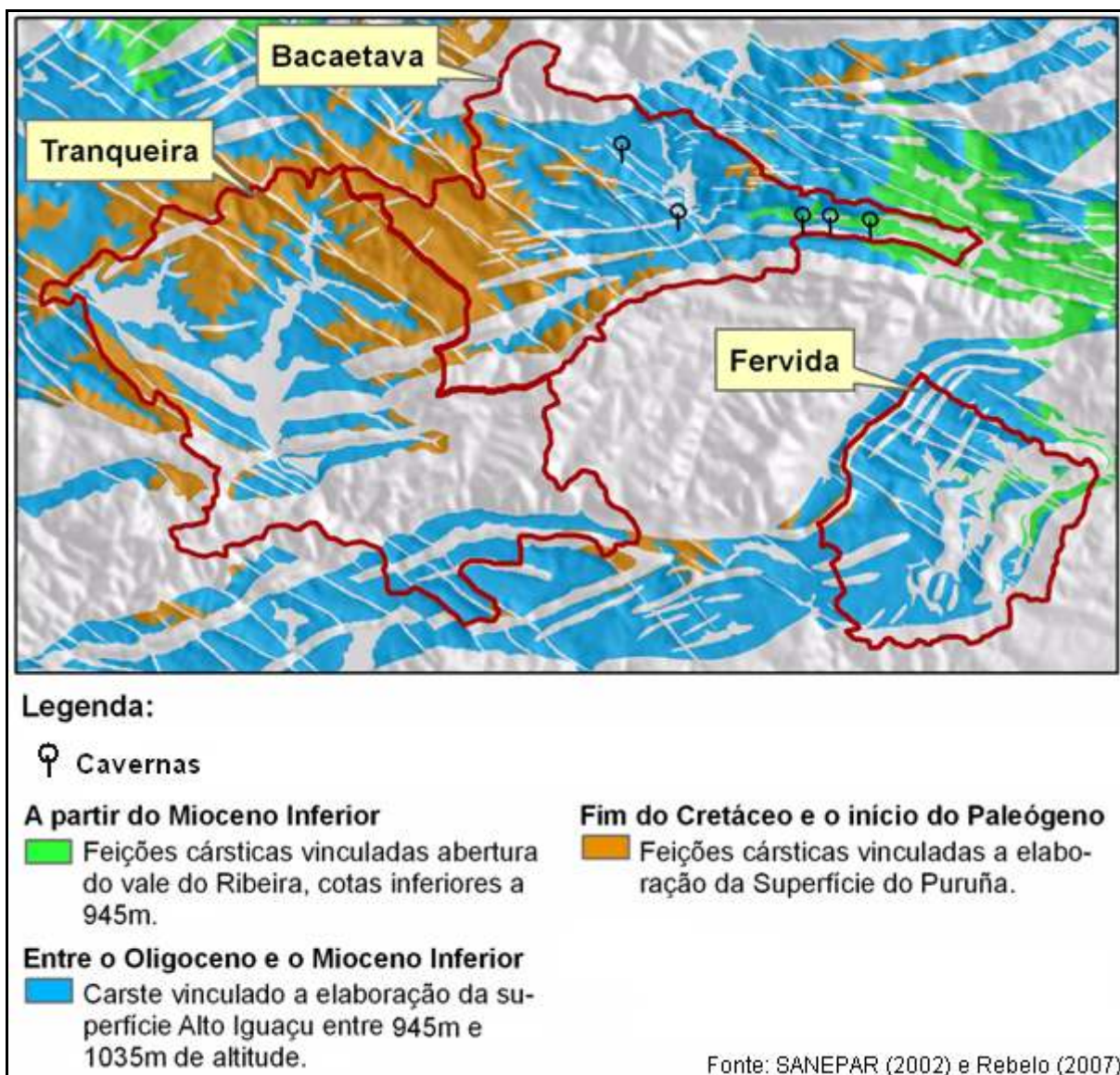


FIGURA 6 - Ocorrência das áreas com carstificação correlatas à elaboração das Paleosuperfícies do Puruã, Alto Iguaçu e da abertura do Vale do Rio Ribeira. Baseado em Rebelo *et al* 2004.

5.4 Processo de carstificação e espeleogênese

O termo Carste segundo Teixeira *et al* (2001), refere-se à tradução do termo alemão *Karst*, originado da palavra *Krasz*, nome dado a uma paisagem da atual Croácia e Eslovênia, onde há presença de rios subterrâneos, cavernas e outras feições derivadas da dissolução de rochas carbonáticas.

Os terrenos com morfologia e presença de feições cársticas normalmente se desenvolvem em rochas carbonáticas, no entanto, o fenômeno de carstificação não se restringe a essa litologia, desenvolvendo-se também sobre quartzitos, evaporitos

(halita e/ou gipsita), minério de ferro, e em raras ocasiões, em cangas, entre outras litologias (AULER *et al.*, 2001).

Os sistemas cársticos podem se desenvolver em superfície, subsuperfície e em profundidade, e apresentar, dependendo do seu contexto geológico e/ou geográfico, conexão ou não entre sistemas desenvolvidos em superfície ou profundidade. A FIGURA 7 representa ambientes cársticos em diferentes contextos, e modela influências da história geológica sobre a espeleogênese e a configuração dos tipos de feições cársticas.

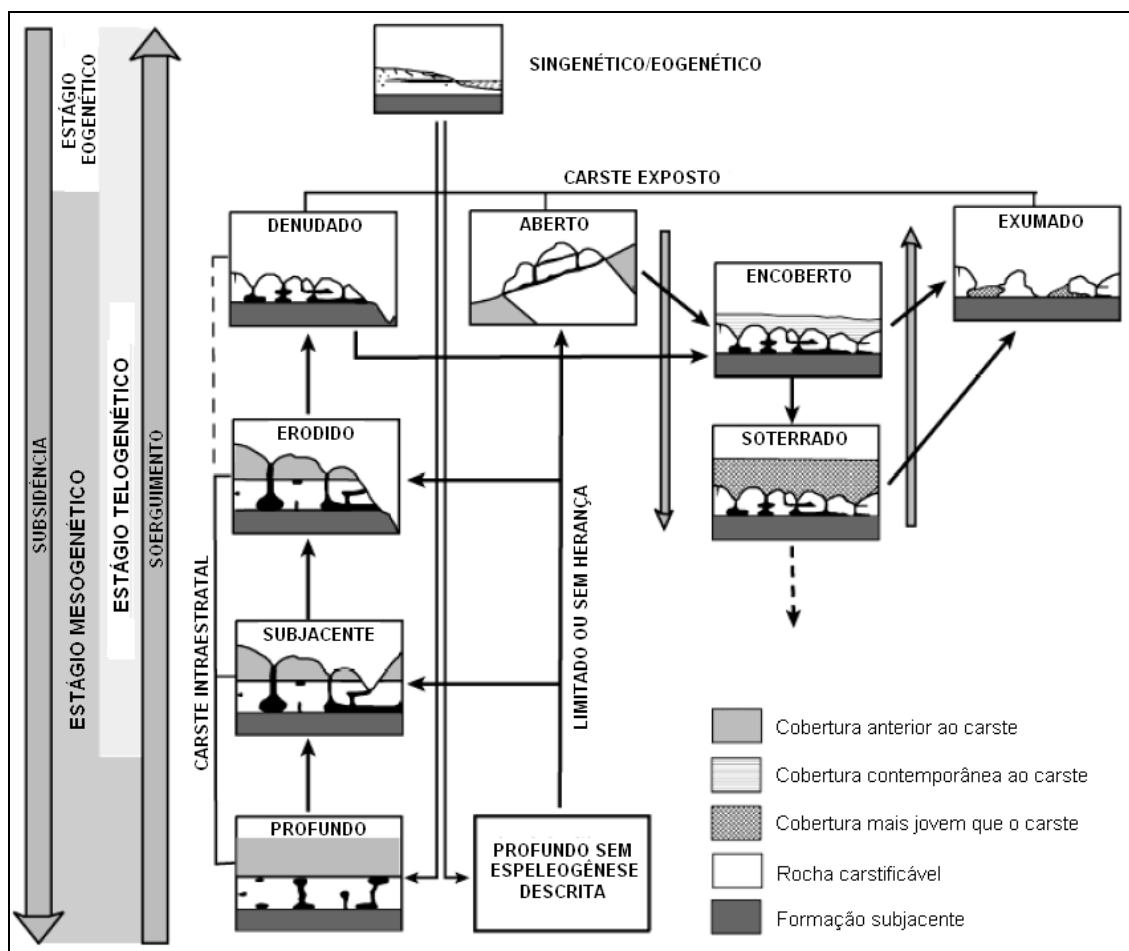


FIGURA 7 - Diferentes fases de evolução de espeleogênese e ambientes cársticos. (KLIMCHOUK and FORD, 2000 *apud* KLIMCHOUK, 2007).

As feições exócarsticas embora ocorram em superfície, estão associadas à existência de desenvolvimento de condutos subsuperficiais, sendo as dolinas as feições exócarsticas mais comuns. Essas feições apresentam-se na paisagem como depressões circulares fechadas ou elípticas que variam de metros a centenas de metros (CVIJIC 1983 *apud* PILÓ, 2000). Quando coalescentes as dolinas formam uvalas, já o termo polje é utilizado para designar uma planície cárstica.

Em relação às feições endocársticas, a literatura admite como passível de ser classificada como caverna toda cavidade natural desenvolvida no subsolo que possua dimensões que permitam acesso a seres humanos, sendo as cavidades de menor proporção tratadas frequentemente como subcondutos, fissuras ou protocavernas. Outro fator que distingue as feições endocársticas diz respeito ao predomínio vertical ou horizontal de seu desenvolvimento, sendo chamadas de cavernas as que possuem desenvolvimento predominante horizontal, e abismos as que possuem desenvolvimento predominante vertical (BITTENCOURT, 2008).

A totalidade dos processos que proporcionam a criação e desenvolvimento de cavidades naturais na forma de aquífero de condutos ou cavernas é definido por Teixeira *et al* (2001), como espeleogênese, também Field (1999) *apud* Bittencourt (2008), define como espeleogênese a totalidade dos processos que geram cavidades naturais subterrâneas.

Para Florenzano *et al* (2008), carstificação é o conjunto de processos que formam as paisagens cársticas, porém outros autores não vinculam este fenômeno à paisagem, atribuindo apenas uma conotação genética, como sinônimo de corrosão de rochas solúveis, seja por processos químicos ou mecânicos.

O desenvolvimento dos processos espeleogenéticos e a consequente abertura de condutos subsuperficiais por carstificação do maciço rochoso são comumente vinculados aos controles epigênicos (superficiais), porém, nem todos os sistemas cársticos conhecidos possuem explicação satisfatória a partir destes controles, sendo melhores compreendidos quando estudados por uma perspectiva de atuação hipogênica. Nesta perspectiva, admite-se a existência de cavidades abertas por fluxos de fluídos ascendentes conduzidos pela pressão hidrostática, ou outra fonte de energia, independente dos controles epigênicos (KLIMCHOUK, 2007).

A evolução geológica e/ou geomorfológica de uma área carstificada pode

permitir o soterramento ou a desconexão dos sistemas cársticos da rede hidrográfica, expondo-os em um contexto diferente de seu ambiente de formação. A esta condição Ford e Willians (1989), atribui o nome de paleocarste, que possui como sinônimos as palavras carste fossilizado e carste fóssil.

6 ANÁLISE REGIONAL

A condição climática atual, bem como as condições climáticas pretéritas, proporcionaram um ambiente favorável ao desenvolvimento do intemperismo e erosão química dos litotipos existentes, sendo os metadolomitos as rochas preferencialmente dissolvidas, quando comparados com as demais litologias de composição silicática da Formação Capiçu e da Formação Serra Geral.

A maior favorabilidade de dissolução dos metadolomitos condiciona sua posição geomórfica comumente como áreas topograficamente rebaixadas e relativamente planas, limitadas normalmente por cristas quartzíticas e diques de diabásio.

Com o objetivo de um melhor entendimento das características do relevo na área estudada, e sua relação com os tipos de feições cársticas ocorrentes na BAI e na BAR, optou-se pela análise morfométrica exclusivamente das áreas de ocorrência dos metadolomitos. Essas rochas apresentam maior favorabilidade aos processos erosivos atuantes na região e possivelmente refletem as diferenças morfométricas, resultantes da atuação de diferentes sistemas erosivos nas duas bacias hidrográficas.

6.1 Características hipsométricas dos metadolomitos da BAI e da BAR

6.1.1 Bacia do Alto Rio Iguaçu (BAI)

A região de ocorrência dos metadolomitos ocupa uma área de aproximadamente 41,20 km², e possui uma amplitude altimétrica de cerca de 90m (1125-935m). Os intervalos mais frequentes estão entre: 950–975, 975 – 1000 e 1000–1025 (FIGURA 8), e são representados na figura por áreas relativamente aplainadas, localizadas preferencialmente nas regiões onde ocorrem as planícies aluviais. Estas planícies são geralmente limitadas pelos diques de diabásio e/ou por outras litologias mais resistentes e apresentam-se como “degraus” aplainados.

Os metadolomitos ocorrentes nesta bacia estão quase que totalmente localizados nas regiões de Tranqueira e São Miguel, nos municípios de Almirante Tamandaré e Colombo. Estas regiões foram estudadas com enfoque no hidrogeológico por Bonacim (1996) e Lisboa (1997), e são reconhecidas como uma das principais áreas de exploração hídrica do Aquífero cárstico da RMC.

A assimetria do histograma de frequência altimétrica dos metadolomitos dessa bacia hidrográfica representa principalmente nos intervalos menores que 1000m o carste correlato à evolução da Superfície de Aplainamento do Alto Iguaçu, já nos intervalos superiores a 1000m, há a representação predominante dos metadolomitos com carstificação relacionada à Superfície de Aplainamento do Purunã (FIGURA 8).

Nas áreas mais elevadas, em cotas superiores a 1000m, onde a carstificação é relacionada à evolução da Superfície de Aplainamento do Purunã, os intervalos hipsométricos são menos frequentes, e os metadolomitos possuem feições típicas de paleocarstes, com presença de torres e pináculos cársticos (FIGURA 9).

6.1.2 Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR)

Na BAR a área de ocorrência dos metadolomitos perfaz cerca de 101,02 km², e tem variação altimétrica de cerca de 360m (1190-830). A exemplo da BAI ocorrem intervalos altimétricos bastante representativos nas faixas entre 950 e 1025m, e intervalos menos frequentes superiores a 1000m. Porém, ocorrem nesta bacia intervalos inferiores a 935m que representam a erosão remontante do sistema hidrográfico Açungui-Ribeira (FIGURA 10).

As lentes metadolomíticas, exceto na região leste da área estudada, apresentam um relevo mais movimentado, com planícies aluviais menores em relação à BAI (FIGURA 10). Também os intervalos hipsométricos são mais adensados em relação aos metadolomitos ocorrentes na BAI, o que denota um relevo mais movimentado.

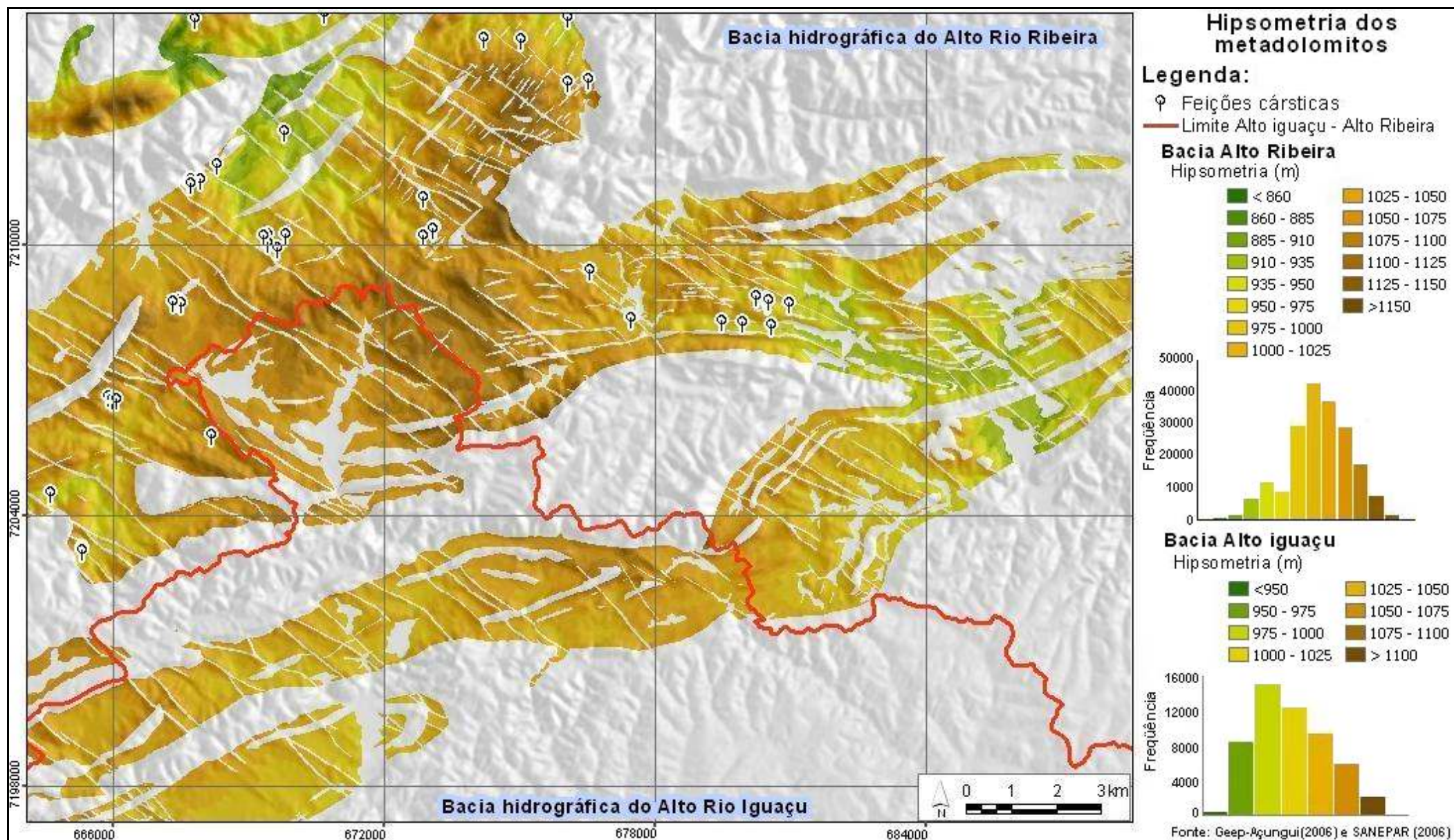


FIGURA 8 - Hipsometria dos metadolomitos da BAI e da BAR.



FIGURA 9 - Torres e pináculos cársticos. Pedreira da empresa Calfibra localizada na Região de Tranqueira no município de Almirante Tamandaré - PR. Altitude 1080m.

Os metadolomitos existentes na porção leste dos metadolomitos da BAR possuem características morfológicas semelhantes aos metadolomitos que ocorrem na bacia do Alto Rio Iguaçu, com relevo mais plano e planícies aluviais que ocupam extensas áreas (FIGURA 11).



FIGURA 10 - Área montanhosa onde ocorrem lentes calcárias próximo à cabeceira do Rio Bacaetava, observar pedreira de calcário.



FIGURA 11 - Área plana com presença de lagos. Sub-bacia do Rio Fervida no Município de Colombo - PR.

6.2 DRENAGENS NOS METADOLOMITOS – ESCALA REGIONAL

6.2.1 Bacia do Alto Iguaçu (BAI)

A BAI na região estudada apresenta forte condicionamento estrutural de suas drenagens, pois como aponta Bonacim (1996), há um claro controle estrutural condicionado pelo complexo arcabouço litológico-estrutural que se traduz na instauração de rios subseqüentes, instaurados principalmente sobre metadolomitos.

Nas lentes metadolomíticas notam-se diferentes densidades de drenagens, com densidade alta na região de cabeceira do Rio Barigui onde o relevo é mais movimentado, e menos densa nas áreas mais planas a jusante das cabeceiras, onde ocorrem drenagens principais mais longas e caudalosas e quase não há drenagens superficiais de primeira ordem.

Importante papel exerce os diques de diabásio neste contexto hidrográfico, pois nas áreas onde a encaixante são os metadolomitos apresentam-se geralmente como cristas alongadas de direção geral N50-60°W, que comumente condicionam a existência de canais fluviais paralelos (entre as cristas formadas por diques de diabásio). Porém em áreas onde a encaixante é mais resistente apresentam como baixos topográficos, onde os rios instauram seus cursos (LISBOA, 1997).

Nas litologias onde a carstificação não se desenvolve, tem-se com frequência uma densidade maior de canais fluviais, decorrentes da inexistência de canais sub-superficiais e menor infiltração das águas fluviais e pluviais. Tais litologias são representadas principalmente pelos filitos e quartzitos da Formação Capiu e pelo Complexo Gnáissico-Migmatítico. Os rios nestas regiões têm padrão normalmente dentrítico, com cursos irregulares e curtos (BONACIM, 1996).

O rio Barigui apresenta-se como o principal rio da região em termos de área mapeada, o que permite observar o controle estrutural imposto no seu curso. Como pode ser observado na FIGURA 12, o canal principal do rio tem seu curso alternado ora para NW-SE aproveitando os baixos topográficos impostos pelos diques intemperizados, ora para NE-SW, aproveitando as linhas de contato, falhas e fraturas, controlado pelo *trend* estrutural do Proterozóico Superior.

Já a direção N-S, possivelmente deve-se à existência de um empilhamento delgado da Formação Capiu sobre o Complexo Gnáissico-Migmatítico, o que permite o reflexo da direção principal de falhamento N-S verificada por KUZ (2003), em estudos sobre o arcabouço estrutural do Complexo Gnáissico-Migmatítico (FIGURA 12).

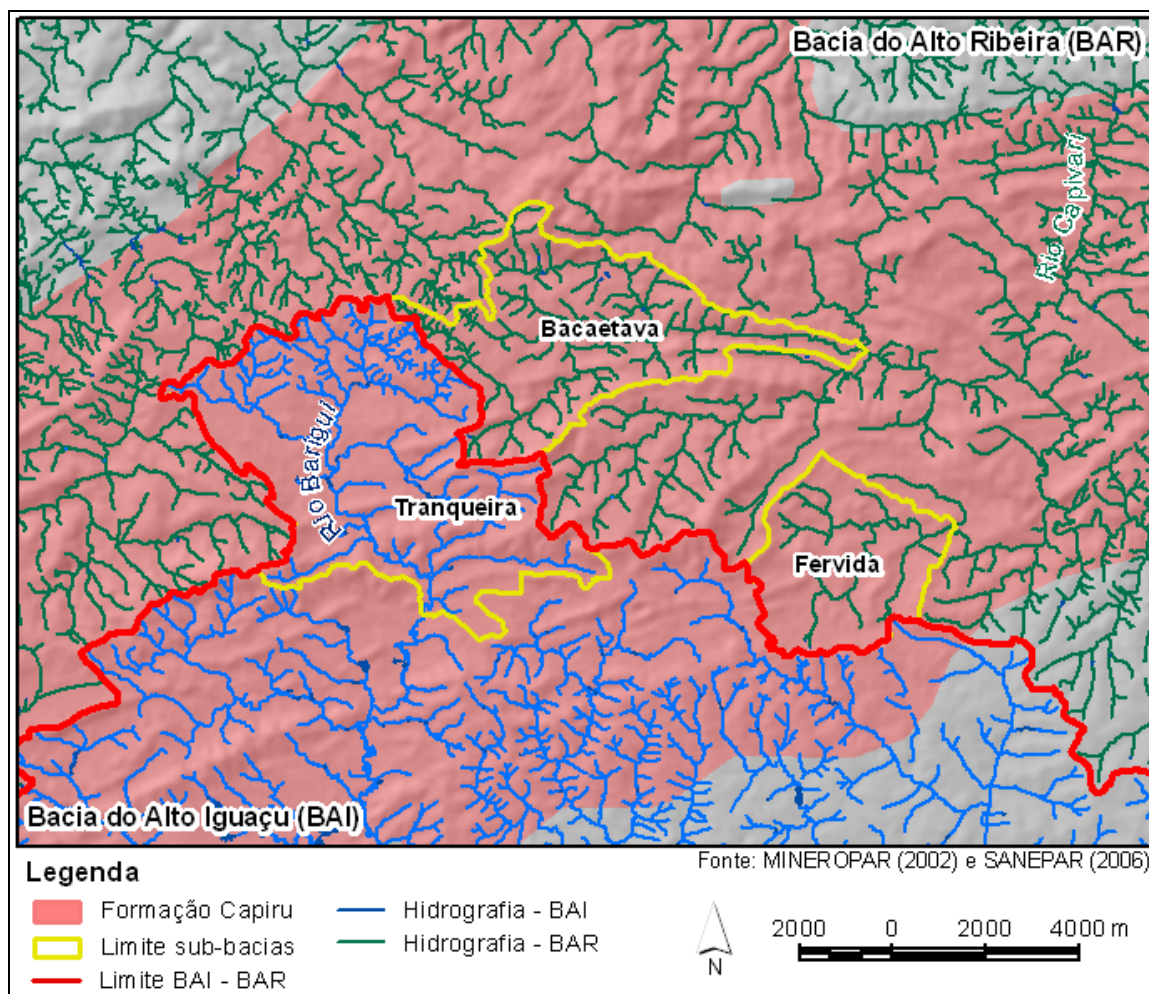


FIGURA 12 - Drenagens e relevo sombreado da BAR e da BAI na região estudada.

6.2.2 Bacia do Alto Ribeira (BAR)

A exemplo da abordagem anterior foca-se a análise nas áreas de ocorrência dos metadolomitos. Porém, visto a insuficiência na explicação de fenômenos geográficos com a análise segmentada de uma região que está inserida num sistema mais amplo, quando necessário a análise será realizada no contexto regional, pautada no estudo da bacia hidrográfica.

Na região da BAR, ocorrem várias sub-bacias que compõem três importantes sub-bacias. São elas: sub-bacia do rio Açungui, sub-bacia do rio piedade e sub-bacia do rio Capivari.

Na FIGURA 12, pode-se observar a diferença de densidade e padrão de drenagens existente entre a BAR e a área de ocorrência da BAI, mesmo ambas ocorrendo num contexto geológico semelhante, o que permite identificar com base

nos produtos cartográficos confeccionados alguns fatores que permitem tais diferenças. São eles: o gradiente hidráulico, a Geologia estrutural, existência de níveis de base locais, o processo de captura de drenagens e as características das drenagens nos metadolomitos.

6.2.2.1 O Gradiente hidráulico

Conforme anteriormente mencionado, este estudo foi realizado em uma área limítrofe entre duas grandes bacias hidrográficas com dinâmicas fluviais bastante diferentes, pois enquanto a BAR atinge a cota 500m de altitude no Rio Capivari a cerca de 100 km, com um gradiente de 5m/km. Na BAI esta cota (500m) é alcançada a cerca de 700 km de distância de suas nascentes, com um gradiente de 0,7m/km (CANALI, 1980).

Os gradientes hidráulicos diferenciados na BAI e na BAR, influenciam na capacidade de mobilização, erosão, transporte e deposição dos rios, o que se reflete na paisagem com morfologias distintas em ambiente geológico similar.

6.2.2.2 A Geologia estrutural

As drenagens nos metadolomitos na BAI e na BAR apresentam forte controle estrutural. Os rios geralmente são alinhados segundo a direção dos diques de diabásio e das descontinuidades estruturais.

As descontinuidades estruturais são as áreas preferenciais de instalação das drenagens, e permitem a transposição das mesmas sobre os diques de diabásio e faixas quartzíticas que dividem as células cársticas. Já os diques de diabásio segundo Lisboa (1997) e Bonacim (1996) são a principal componente estrutural na evolução das drenagens, pois seu rompimento permitiu a abertura de vales e capturas de drenagens que regem a paisagem atual, além de condicionarem a direção geral das drenagens quando intrudidos em metadolomitos.

Na FIGURA 12, pode-se observar que o paralelismo entre os canais fluviais na região da BAR, condicionado pelos diques de diabásio encaixados nos

metadolomitos (área em rosa), é mais pronunciado do que na área da BAI e, também, a tendência geral dos canais em ambas as bacias em possuir a direção próxima NE-SW, quando não possuem forte condicionamento pelos diques de diabásio.

Possivelmente o diferente nível de dissecação dos metadolomitos das duas bacias hidrográficas seja o fator determinante para a instauração das drenagens sobre os diques na BAR, e sobre as descontinuidades estruturais na BAI. Pois, enquanto na BAR o estágio evolutivo do relevo permitiu um maior rebaixamento dos metadolomitos e a formação de cristas e vales pelos diques, na BAI onde o relevo é menos dissecado, o condicionamento dado pelos diques é mais incipiente, e a estrutural rúptil de direção NE-SW e N-S são aproveitadas para a instauração das drenagens.

6.2.2.3 Existência de níveis de base locais

A região noroeste da área estudada apresenta erosão remontante de direção NW-SE, exercida pelo sistema hidrográfico da sub-bacia do Rio Açungui. O avanço se dá em direção às bacias dos rios Passaúna e Barigui pertencentes à região da BAI (FIGURA 12). Os canais, nesta região, apresentam forte controle imposto pelos diques, porém, importante papel no barramento da erosão remontante exerce as faixas quartzíticas e filíticas de direção NE-SW, que formam os primeiros escalonamentos de níveis de base locais e provavelmente ajudaram na preservação dos metadolomitos das cabeceiras do Rio Barigui.

Na sub-bacia do Rio Capivari, ao contrário do que ocorre na sub-bacia do Rio Açungui os rios apresentam-se geralmente na mesma direção das cristas quartzíticas, o que confere a esta região menos escalonamentos de níveis de base locais, e exposição de grandes paredões de metadolomitos. Porém, em algumas áreas, ocorrem regiões relativamente planas, possivelmente a menos tempo sob o regime erosivo da BAR (capturadas para esta bacia hidrográfica a pouco tempo).

6.2.2.4 O processo de capturas de drenagens

O trabalho de Lisboa (1997) descreve com notoriedade evidências de capturas de drenagens ocasionadas pelo rompimento das denominadas “CdbS” (Cristas de Composição diabásicas).

(...) A bacia do Passaúna, tem características mais evidentes de controle estrutural, dando a nítida impressão de ter capturado a quase totalidade da drenagem do tanque vizinho a NW da CqfNW, por rompimento consecutivo da CdbSW.

Seu nível de base local, é inferior ao da bacia do Barigui, fato este denotado por uma quebra abrupta de relevo no ponto em que a afluência do Passaúna, no compartimento em estudo rompe a limitante CdbSW. Esta limitante comporta-se como linha de interflúvio, até o ponto de rompimento, sugerindo que anteriormente a este episódio, toda drenagem do compartimento pertencia à bacia do Barigui.

A intermitência das drenagens efluentes do Barigui, até o único ponto de surgência existente, pode estar relacionada ao rebaixamento piezométrico ocasionado pela captura ocorrida.

A drenagem do compartimento pertencente à bacia do Passaúna, tem caráter intermitente, tornando-se ativa apenas nos períodos de intensa pluviosidade. (...).(LISBOA, 1997. p. 86).

O texto acima explica evidências da ocorrência de captura de drenagens do rio Barigui pelo rio Passaúna, bem como mudanças hidrográficas e hidrogeológicas decorrentes deste episódio a nível local, especificamente na região do Compartimento São Miguel, no Município de Almirante Tamandaré na RMC. Tal fato aponta para a importância das capturas de drenagens, pois as mesmas são um dos principais eventos na evolução morfológica e de feições cársticas a nível local e regional, pois permitem a mudança das características hidrogeológicas e consequentemente a evolução dos sistemas cársticos.

6.2.2.5 Características das drenagens nos metadolomitos

As propriedades e padrões de drenagens auxiliam no entendimento dos fatores controladores das características hidrográficas, podendo ser utilizadas como chave para a classificação indireta de uma determinada região. Ou seja, possibilitam inferir quanto às características geológicas, principalmente quanto à porosidade e a existência de controle estrutural nos terrenos. No QUADRO 2, há a classificação de

três propriedades das drenagens nos metadolomitos da BAI e BAR na área estudada.

A densidade de canais é a propriedade que tem relação direta com a solubilidade e porosidade do substrato rochoso, onde as drenagens se instalam, e pode auxiliar no entendimento de dois parâmetros ligados ao fenômeno de carstificação. O primeiro diz respeito à relação solubilidade x erodibilidade derivada do potencial hidráulico dos canais e, o segundo as condições geomorfológicas para a gênese e desenvolvimento de canais.

A relação erodibilidade x solubilidade está diretamente ligada à hierarquia fluvial. Canais de primeira e segunda ordem têm normalmente potencial hidráulico menor, facilitando a solubilidade e o consequente desenvolvimento de condutos cársticos, enquanto canais de terceira e quarta ordem possuem, em geral, potencial hidráulico suficiente para produzirem entalhamento nas rochas carbonáticas.

Propriedades de drenagem			
Propriedade	Bacia Hidrográfica		Características
	BAI	BAR	
Angularidade	Média	Média	Mudanças bruscas nas direções dos canais.
Densidade de canais	Baixa	Média a alta	Quantidade de canais por área, diretamente ligado a solubilidade e porosidade do terreno.
Sinuosidade	Mistos (curvos e retilíneos)	Mistos (curvos e retilíneos)	Anomalias no terreno, forte controle estrutural.

QUADRO 2 - Propriedades de drenagem da BAI e da BAR.

Em relação às condições geomorfológicas para a formação e evolução de sistemas cársticos, pode-se, segundo Rebelo *et al* (2007), apontar independentemente de outras variáveis o aplainamento do relevo como o estágio em que os processos de dissolução são mais eficientes.

6.3 DECLIVIDADE DOS METADOLOMITOS – ESCALA REGIONAL

6.3.1 Bacia do Alto Iguaçu (BAI)

Os metadolomitos da BAI apresentam três intervalos bastante significativos de declividade, que representam quase a totalidade da área que é de 49 km². Na FIGURA 13, observa-se que os intervalos <5, 5-12 e 12-30%, representam mais de 99% da área.

Os intervalos de frequência <5 e 5-12% representam 82% da área, e localizam-se principalmente nos vales dos rios principais de direção próxima N-S. Já as áreas com intervalos acima de 12% estão geralmente nas zonas de contatos entre os diques de diabásio com os metadolomitos, e nos contatos litológicos destes com os metassedimentos (FIGURA 14).

O histograma de frequência de declividades por área (FIGURA 13) apresenta geometria assimétrica, com maior frequência nos intervalos entre 5-12%, onde estão preferencialmente hospedados as feições exocársticas, representadas principalmente por dolinas, campo de sumidouros, fontes de água minerais, uvalas entre outras (SILVA e OKA FIORI, 1994).

As feições típicas de paleocarstes ocorrem comumente em declividades mais elevadas, superiores a 30%, e correspondem às áreas que testemunham a Paleosuperfície do Purunã.

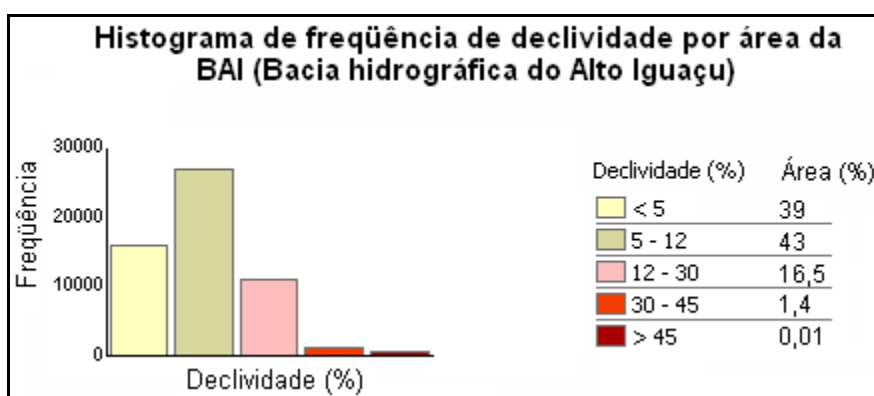


FIGURA 13 - Histograma e TABELA mostrando a percentagem de área em cada intervalos de declividade na bacia hidrográfica do Alto Rio Iguaçu.

6.3.2 Bacia do Alto Ribeira (BAR)

Os metadolomitos da BAR apresentam intervalos de declividade com representação mais significativa dos intervalos superiores a 30%, o que confere à esta bacia um incremento dos intervalos de maior declividade em relação a BAI (FIGURA 14).

Nesta bacia, os metadolomitos da área de estudo abrangem cerca de 124 km², mais de 67% dos metadolomitos da área estudada, e os intervalos de menor declividade representam cerca de 51,8%. Já o intervalo médio entre 12-30% representa quase 48,2% da área. Os intervalos de maior declividade acima de 30% chamam mais atenção, pois enquanto na BAI representam apenas 1,41% da área, na BAR representam cerca de 7% da área (FIGURA 15). A FIGURA 16 mostra uma vertente com declividade superior a 30% com presença de pedreira para a exploração de metadolomito.

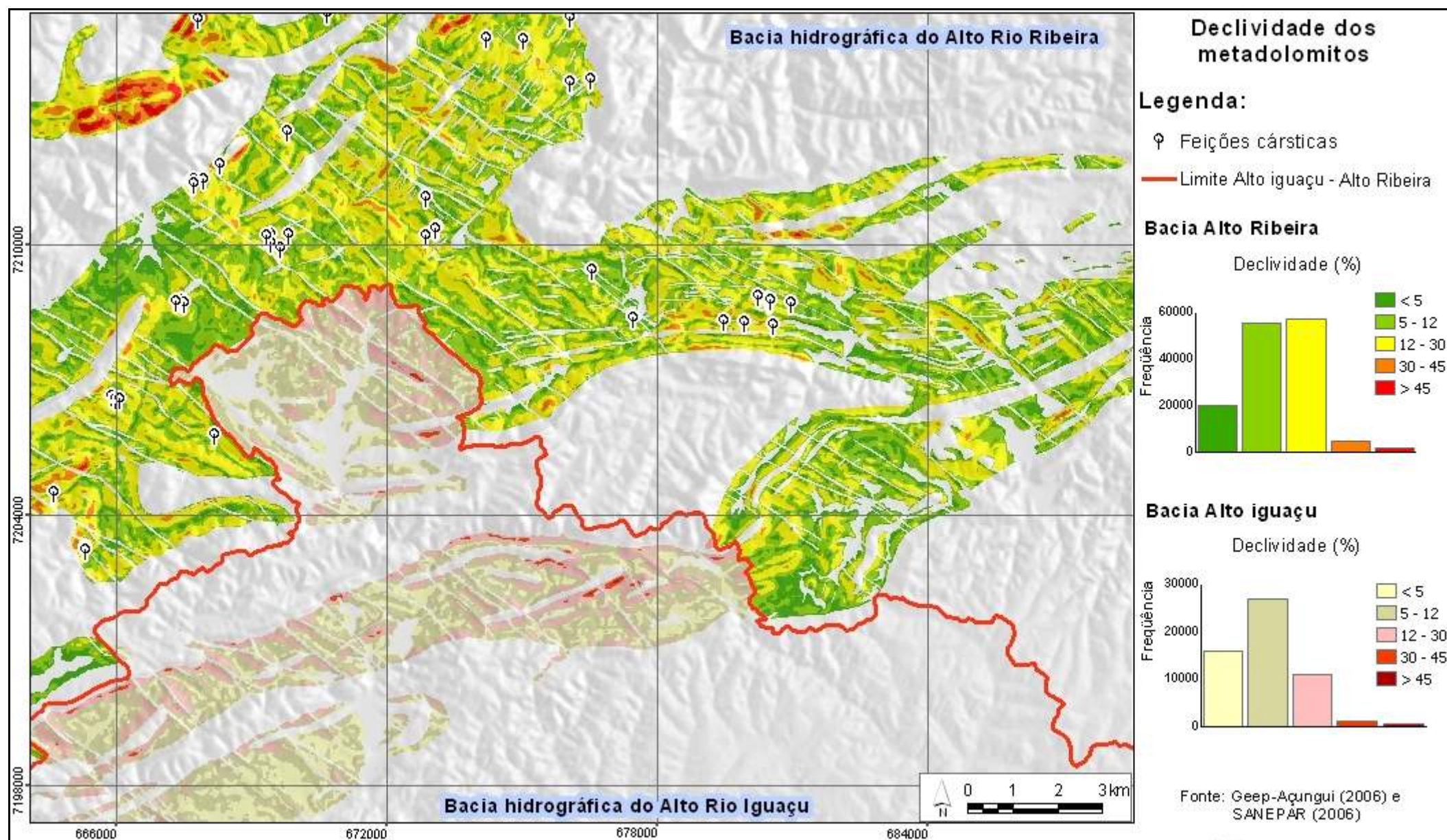


FIGURA 14 - Declividade dos metadolomitos da BAI e da BAR.

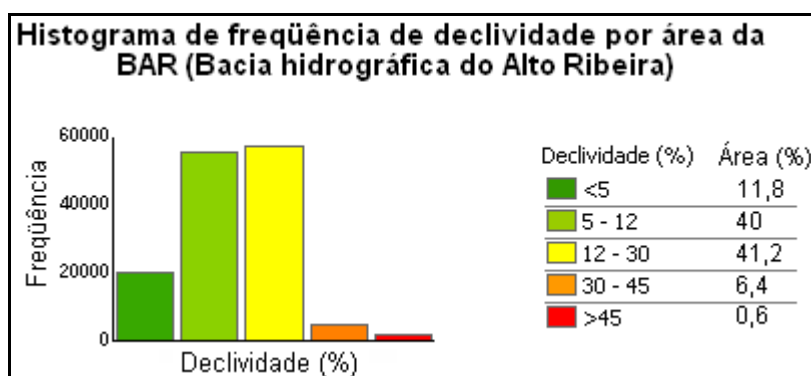


FIGURA 15 - Histograma e TABELA mostrando a percentagem de área em cada intervalos de declividade na bacia hidrográfica do Alto Rio Ribeira.



FIGURA 16 - Relevo acidentado com declividade superior a 30%, em uma das pedreiras localizadas na sub-bacia do Rio Bacaetava, município de Colombo - PR. Observar à esquerda a vertente coberta por vegetação.

6.4 RUGOSIDADE CONCENTRADA DO RELEVO NOS METADOLOMITOS – ESCALA REGIONAL

6.4.1 Bacia do Alto Iguaçu (BAI)

Os cerca de 49 km² de área de ocorrência de metadolomitos da BAI apresentam 66% de sua área em intervalos com Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) entre 1.607 e 12.181, os menores verificados na área. Conforme pode ser observado na TABELA 2, o intervalo médio entre 12.181 e 14.549, abrange 16% da área, e os intervalos de maior ICR cerca de 17%.

TABELA 2 - Percentagem de área por intervalo de ICR da BAI.

Concentração da Rugosidade		
Classes	BAI - Área (%)	Classificação
1	42	Rugosidade muito baixa
2	24	Rugosidade baixa
3	16	Rugosidade média
4	12	Rugosidade alta
5	5	Rugosidade muito alta

No gráfico da FIGURA 17, observa-se o decréscimo de área abrangida concomitantemente ao aumento do percentual de ICR, e na FIGURA 18, nota-se que os intervalos de menor frequência abrangem praticamente toda a área estudada. Já os intervalos de alto ICR estão relacionados principalmente às áreas de ocorrência de falhas de cavalgamento e secundariamente à presença de diques de diabásio.

6.4.2 Bacia do Alto Ribeira (BAR)

Ocorrem na área pertencente à BAR cerca de 124 km² de metadolomitos, e ao contrário da BAI, são mais frequentes os intervalos que representam ICR mais acentuado. Como pode ser observado no gráfico da FIGURA 17, há um aumento da área abrangida concomitantemente à elevação do ICR, fato observado também na TABELA 3.

Quase 50% dos metadolomitos estão localizados em áreas com presença dos índices de rugosidades concentradas (ICR) mais altos, entre 14.549 e 41.853, e ocorrem principalmente nos contatos com os diques de diabásio, e secundariamente próximos às falhas de cavalgamento, que em relação aos diques ocorrem de forma mais incipiente (FIGURA 18).

Os intervalos de baixo e médio ICR entre 12.181 e 14.549 abrangem 22% da área, já os intervalos entre 1.607 e 12.181, que representam as áreas de baixo ICR abrangem 29% da área (FIGURA 17). As áreas de baixa concentração da rugosidade são representadas principalmente pelos vales dos rios.

TABELA 3 - Percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada da BAR.

Rugosidade Concentrada		
Classes	BAI - Área (%)	Classificação
1	11	Rugosidade muito baixa
2	18	Rugosidade baixa
3	22	Rugosidade média
4	24	Rugosidade alta
5	25	Rugosidade muito alta

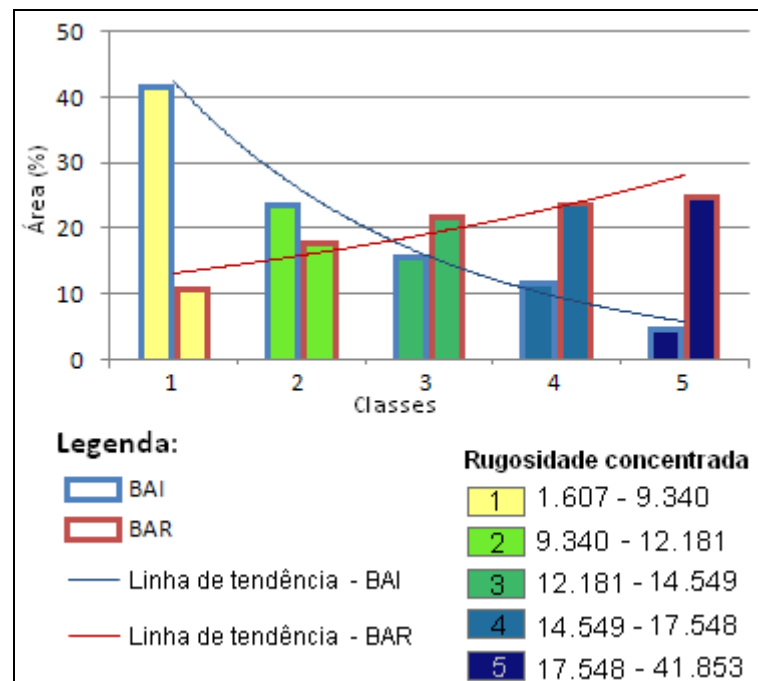


FIGURA 17 - Gráfico representando a área por intervalo de rugosidade concentrada na área de ocorrência de metadolomitos da BAI e da BAR.

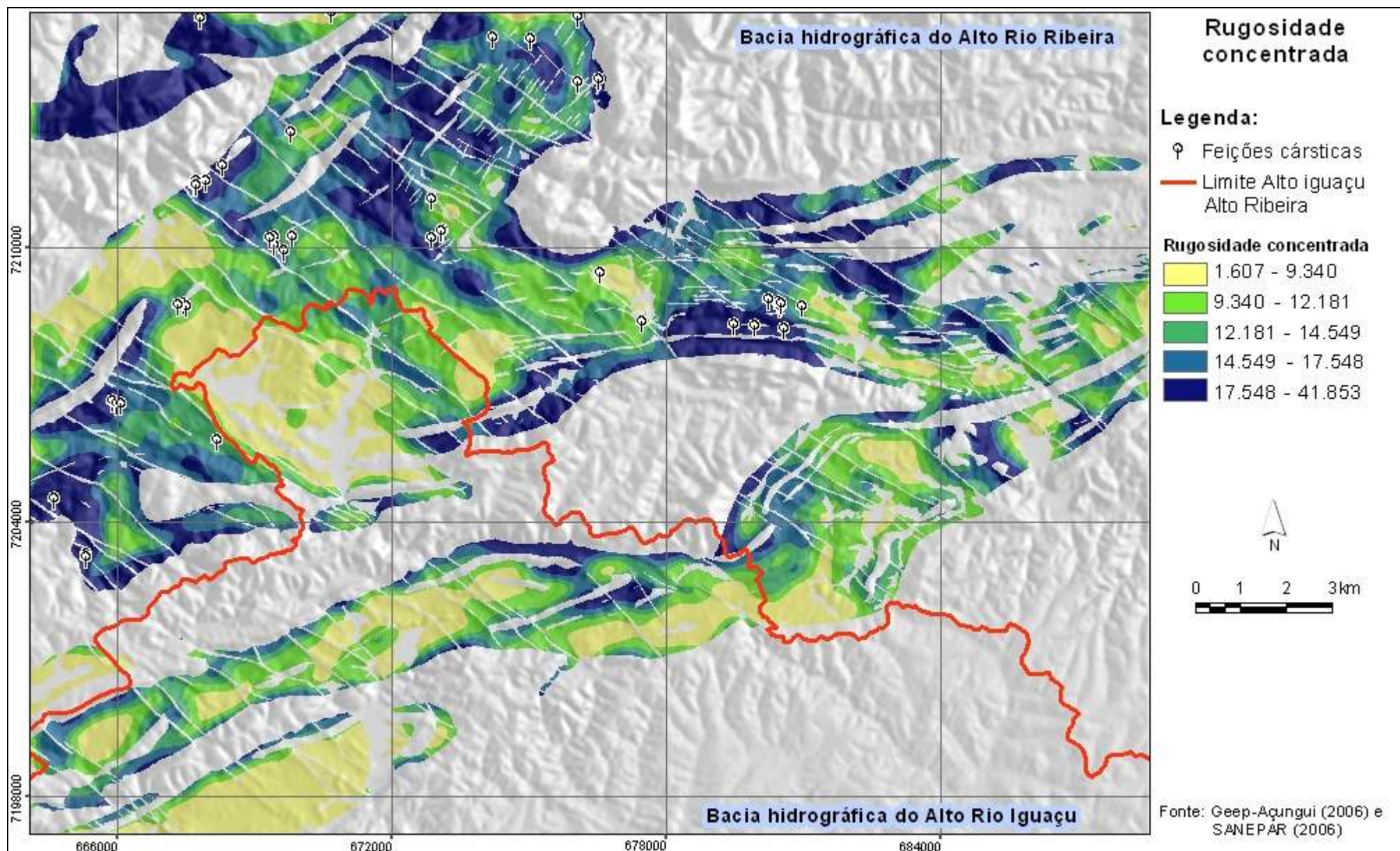


FIGURA 18 - Rugosidade concentrada dos metadolomitos da BAI e da BAR.

7 ANÁLISE DAS SUB-BACIAS

7.1 Sub-bacia de Tranqueira – Bacia do Alto Rio Iguaçu (BAI)

A sub-bacia de Tranqueira ocupa uma área de aproximadamente 33,5 km², distribuídos pelos municípios de Colombo e Almirante Tamandaré, no extremo norte da BAI. Seu curso representa as nascentes do rio Barigui onde, segundo Bonacim (1996), o rio Barigui percorre um trajeto de 8 km, dos cerca de 60 km entre suas nascentes, na Serra da Betara, e sua foz no rio Iguaçu.

Ao contrário das demais sub-bacias estudadas, a região de Tranqueira não pertence ao sistema hidrográfico Alto Ribeira, possuindo dinâmica hidrogeomorfológica diferenciada, que contribui para a existência de um sistema aquífero cárstico em relativo equilíbrio com a paisagem, conforme Rebelo *et al* (2007).

A existência de sistema aquífero cárstico hospedado em metadolomitos (FIGURA 19) confere a esta região uma disponibilidade hídrica que auxilia no abastecimento público da RMC, a qual começou a ser explorada com maior intensidade principalmente a partir da década de 90, devido ao incremento populacional da RMC e o consequente aumento da demanda hídrica para o abastecimento público.

7.1.1 Geologia

Na sub-bacia de Tranqueira, ocorrem litologias pertencentes à Formação Capiru do Grupo Açungui, com presença de rochas metadolomíticas e silicáticas cortadas por diques de diabásio da Formação Serra Geral e recobrimentos por sedimentos quaternários Holocenos. (FIGURA 20)

Dos cerca de 33,5 km² desta sub-bacia, 16,1 km² são cobertos pelos metadolomitos e 15,6 km² por filitos e quartzitos, já os diques de diabásio ocupam aproximadamente 1,8 km².

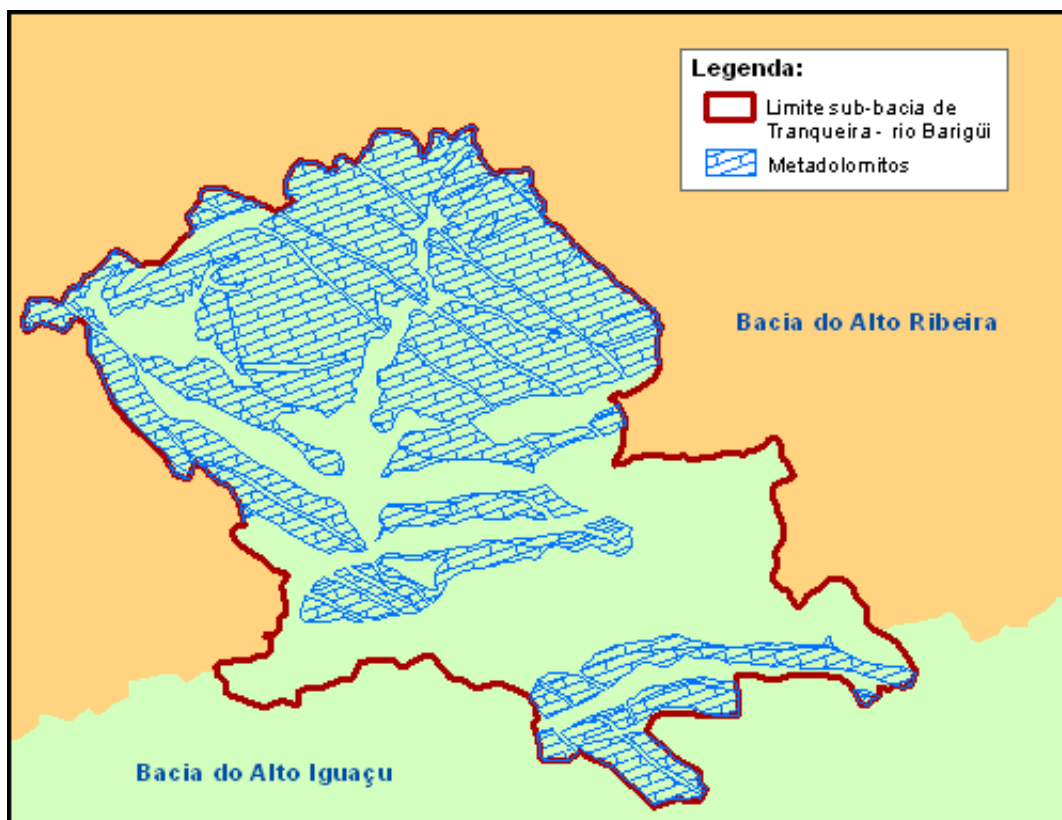


FIGURA 19 - Metadolomitos ocorrentes na sub-bacia do Rio Tranqueira.

7.1.2 Características estruturais

O contexto estrutural do Grupo Açungui descrito por Fiori (1994) está presente por toda a sub-bacia, com o registro de estruturas advindas de eventos que fraturaram, falharam e dobraram a Formação Capiru, o que proporciona um relevo estruturalmente condicionado (FIGURA 21).

O caráter dúctil-rúptil da evolução geológica estrutural foi localmente descrito por Bonacim (1996), do ponto de vista de sua influência no processo de carstificação. Essa autora conclui que as fraturas de direção N40-60°W e as de relaxamento de direção N30-50°E, apresentam maior favorabilidade para o desenvolvimento do processo de carstificação. Já em relação às dobras, que normalmente apresentam-se localmente como sinformes, o traço axial N60-70°E apresenta os locais mais favoráveis para o desenvolvimento deste processo.

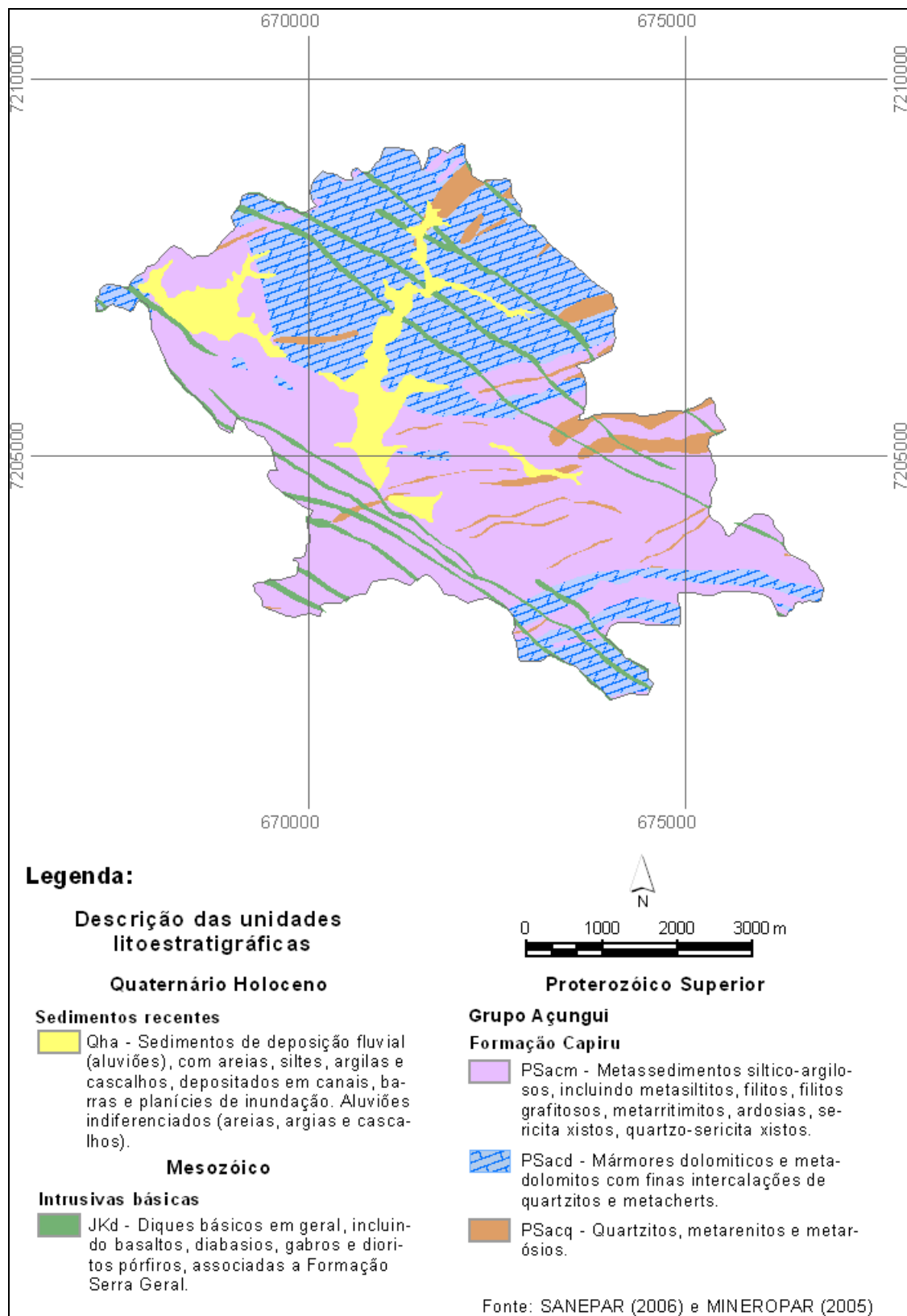


FIGURA 20 - Geologia da sub-bacia de Tranqueira.

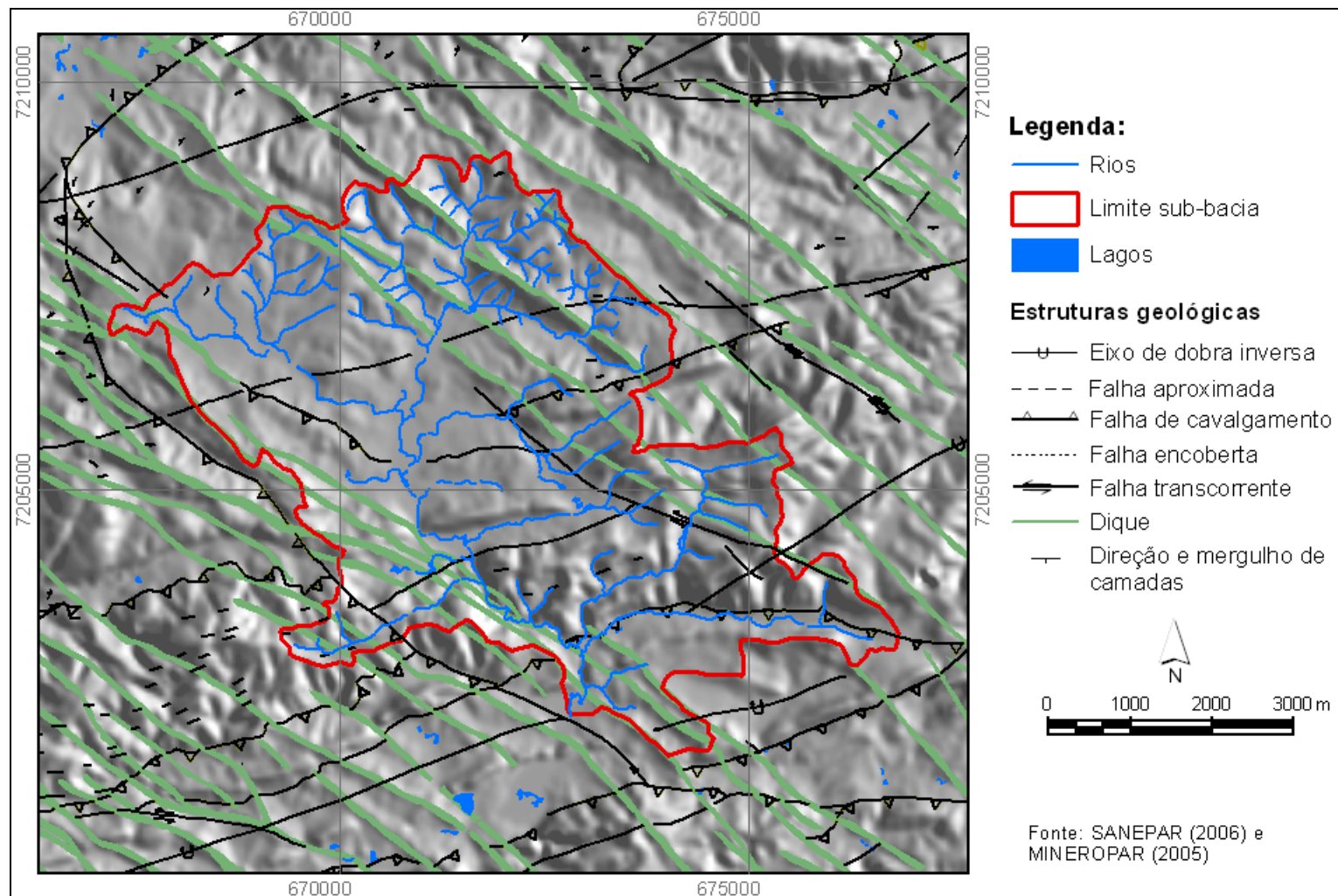


FIGURA 21 - Principais estruturas geológicas ocorrentes na sub-bacia de Tranqueira e região.

A paisagem local apresenta forte condicionamento litoestrutural. Um exemplo desse controle são as falhas de cavalgamento de Morro Grande e Pessegueiro com traços axiais próximos a NE, NW e E-W, apresentadas na FIGURA 22 (Seção Geológica), adaptada de Fiori (1994) por Bonacim (1996), que expõem o acamamento sedimentar dobrado em faixas litológicas, as quais se apresentam como altos ou baixos topográficos dependendo da litologia encaixante.

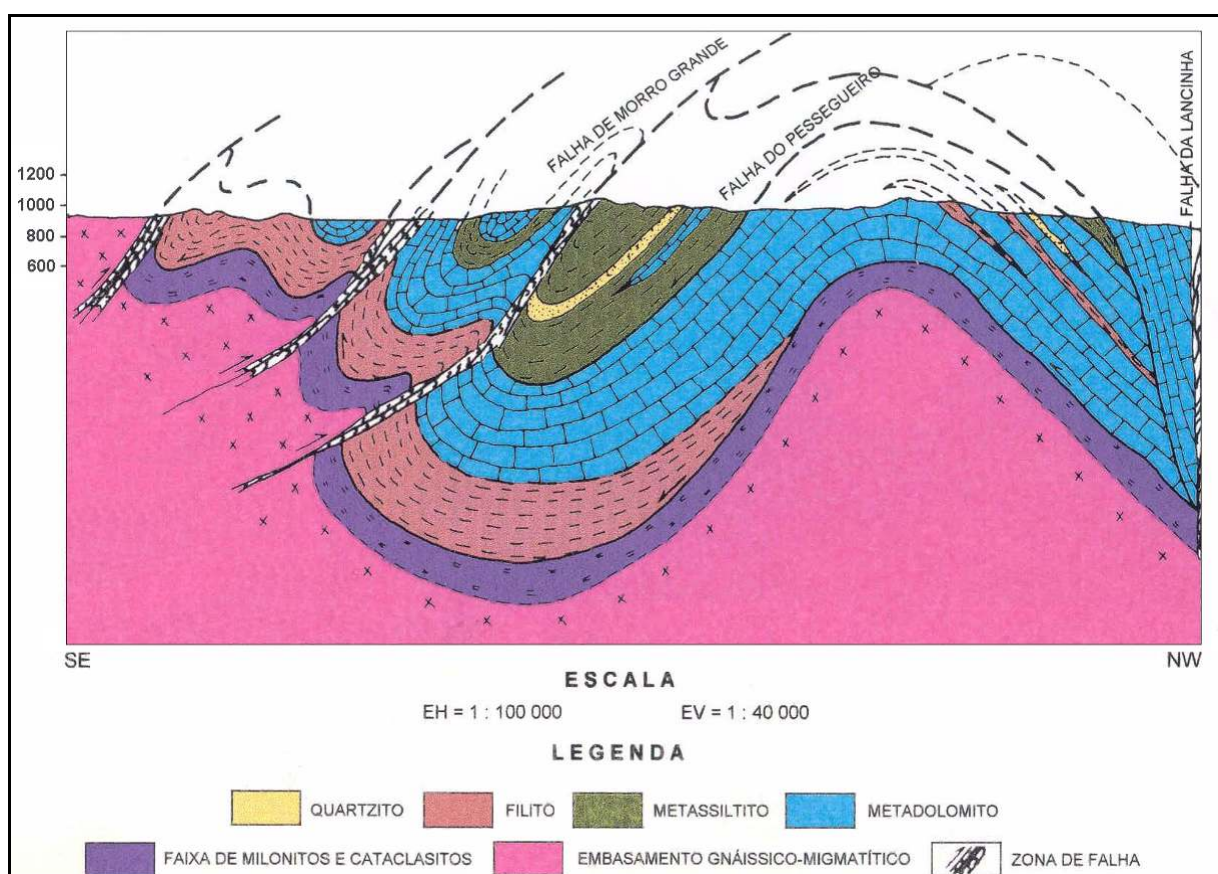


FIGURA 22 - Seção Geológica da área de estudo. Adaptado de Fiori (1994) *apud* Bonacim (1996).

Segundo Bonacim (1996), os fraturamentos de direção N30-50°E e N10-20°E são relacionados ao aparecimento da falha da Lancinha e os fraturamentos de direção N40-60°W são relacionados ao evento rúptil responsável pela intrusão dos diques de diabásio. A FIGURA 23 apresenta as principais lineações estruturais verificadas pela autora em fotografias aéreas nas escalas 1:25.000 e 1:70.000 (FIGURA 24).

Segundo Fiori (1994), todas estas direções foram reativadas em vários eventos tectônicos posteriores, durante o Fanerozóico, principalmente a direção

N40-50W na Era Mesozóica, e as direções NS e EW na Era Cenozóica.

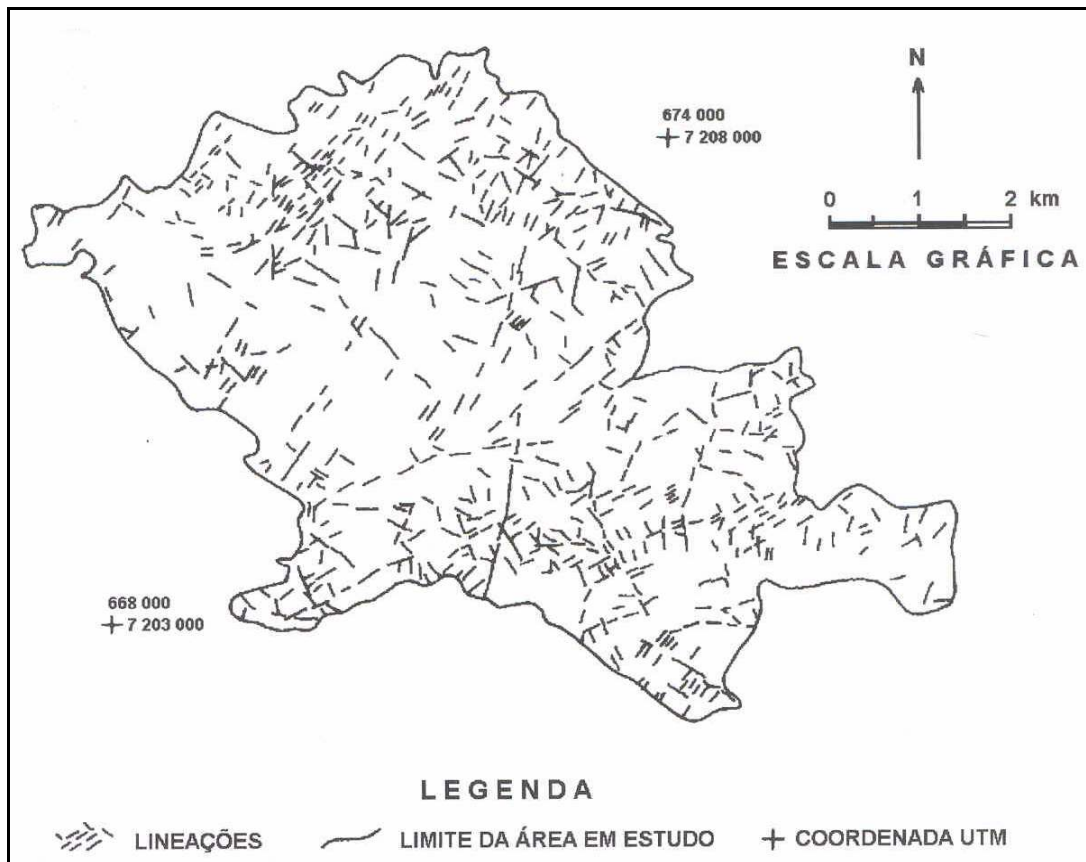


FIGURA 23 - Principais Lineações traçadas em fotografias aéreas na escala 1: 25.000 e 1: 70.000 na Sub-bacia de Tranqueira (adaptado de BONACIM, 1996).

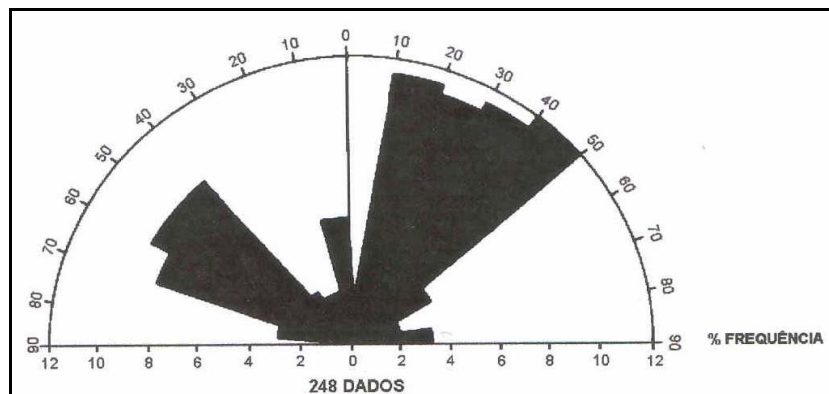


FIGURA 24 - Diagrama de rosetas demonstrando os principais lineamentos estruturais da região da Sub-bacia de Tranqueira.

7.1.3 Hipsometria

Os metadolomitos ocorrentes na sub-bacia de Tranqueira perfazem uma

área de 16,1km², com intervalo altimétrico de ocorrência de 170m, sendo suas cotas mínimas e máximas respectivamente 955m e 1125m. A altitude média de ocorrência dessa litologia é de 1034m, com desvio padrão de 26m.

A faixa altimétrica de ocorrência dos metadolomitos em Tranqueira corresponde a praticamente toda faixa altimétrica de ocorrência dos metadolomitos da BAI, que varia entre 941m e 1110m de altitude, possibilitando uma análise representativa dos metadolomitos existentes nesta bacia hidrográfica (FIGURA 25B).

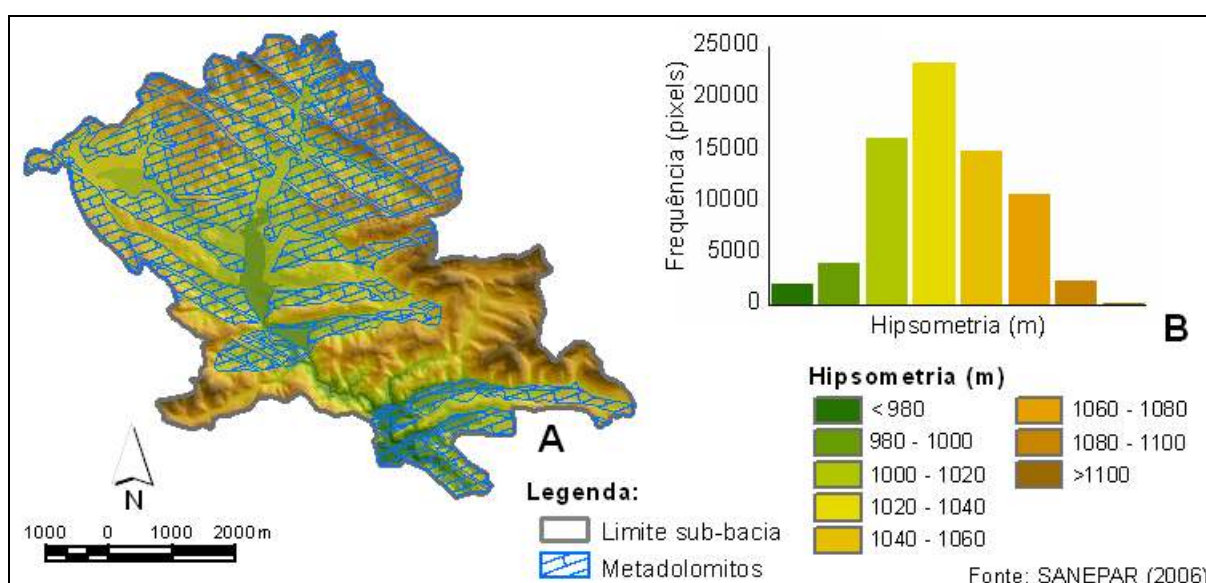


FIGURA 25 - hipsometria e histograma de frequência altimétrica da sub-bacia de Tranqueira.

As feições cársticas ocorrentes nesta sub-bacia são exclusivamente exocársticas (dolinas, poljes e uvalas, entre outras) e ocorrem com maior frequência entre o intervalo altimétrico 955 e 1060m (FIGURA 25A). Já as feições do endocarste, conforme se verifica nos perfis descritivos dos poços perfurados pela SANEPAR, estão em zona saturada, somente acessíveis através da perfuração de poços, com profundidade média de carstificação de 50m segundo Bonacim (1996).

O histograma de frequência altimétrica possui geometria simétrica, com maior frequência do intervalo altimétrico entre 1000 e 1080 m, onde estão contidos 89% da área de ocorrência de metadolomitos da sub-bacia. As áreas com altitudes superiores a 1080m representam 7,9% da área total, e as abaixo de 1000m cobrem apenas 3,1%.

A média altimétrica dos metadolomitos de Tranqueira é de 1034m com

desvio padrão de 26m, abaixo do encontrado para a BAI (35m) e para a BAR (49m), enquadrando a sub-bacia de Tranqueira no domínio regional mais aplainado, característico da BAI.

7.1.4 Declividade

A área de ocorrência de rochas metadolomíticas na sub-bacia de Tranqueira, cerca de 5,4% estão em intervalos de declividade superiores a 30%, sendo que apenas 0,6% encontram-se em intervalos superiores a 45% de declividade. O intervalo entre <5 e 30% representa cerca de 73,4% da área de ocorrência de rochas metadolomíticas (FIGURA 26A e TABELA 4). A existência de um aumento de frequência concomitantemente ao aumento de percentagem de declividade até o intervalo de 30% de declividade confere ao histograma (FIGURA 26B) uma geometria assimétrica, que traduz o relativo aplainamento existente na sub-bacia de Tranqueira.

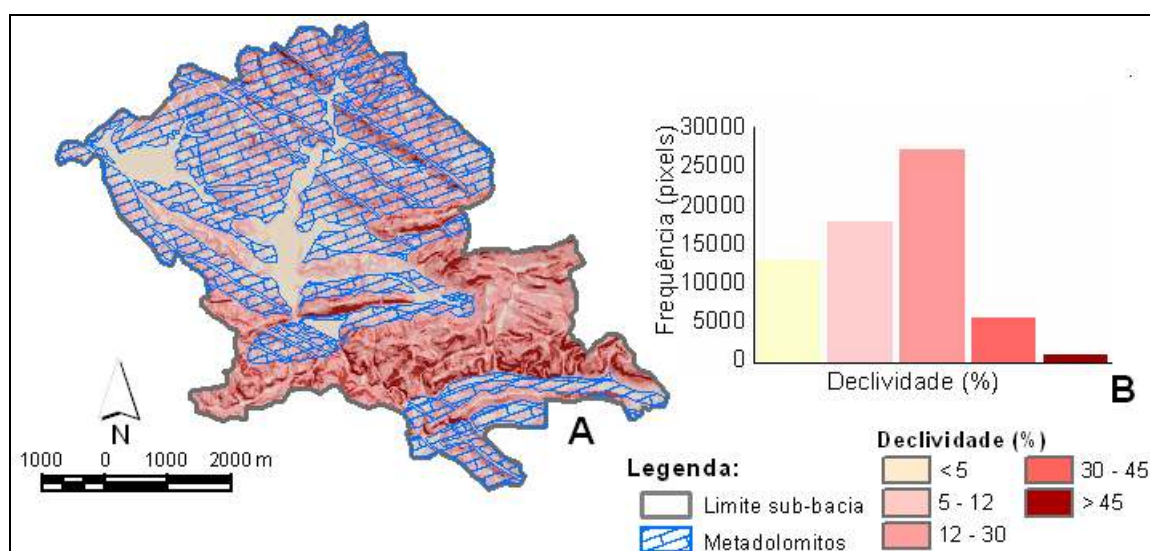


FIGURA 26 - Declividade e Histograma de área por intervalo de declividade dos metadolomitos da sub-bacia do Rio Tranqueira.

Com base nos estudos de Silva e Oka-Fiori (1994) e Bonacim (1996), observa-se que as feições exocársticas ocorrem comumente em declividades inferiores a 12%, nas áreas mais aplainadas.

TABELA 4 - Área por intervalo de declividade dos metadolomitos da sub-bacia de Tranqueira.

Metadolomitos da sub-bacia do Rio Tranqueira		
Declividade (%)	Área (km²)	Área (%)
<5	3,3	21
5 - 12	5,6	36
12 - 30	6,2	37,4
30 - 45	0,9	4,8
>45	0,1	0,6

7.1.5 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)

Os metadolomitos presentes na sub-bacia de Tranqueira possuem cerca de 67% sua área entre os intervalos de Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) de 1.607 – 12.181, que representam as áreas com menor ICR, percentual próximo ao verificado para a BAI nestes intervalos, que é de 66%. Os demais intervalos também são praticamente iguais aos encontrados na BAI, como pode ser observado na TABELA 5.

O gráfico de percentagem de área por intervalo de ICR de Tranqueira (FIGURA 27) e da BAI são semelhantes e apresentam diminuição da quantidade de área concomitantemente ao aumento do percentual do ICR. As áreas com ICR incipiente são zonas preferenciais de ocorrência de feições exocársticas, e coincidem com as áreas de ocorrência da Superfície do Alto Iguaçu.

TABELA 5 - Percentagem de área por intervalo de ICR da Sub-bacia de Tranqueira.

Índice de Concentração da Rugosidade			
Classes	Tranqueira Área (%)	BAI área (%)	Classificação
1	42	42	Rugosidade muito baixa
2	25	25	Rugosidade baixa
3	17	16	Rugosidade média
4	10	12	Rugosidade alta
5	6	5	Rugosidade muito alta

A FIGURA 27 apresenta a distribuição geográfica do ICR, e como pode-se observar, há a concentração de rugosidades mais altas nas áreas com presença de

ocorrência de diques de diabásio, e também nas áreas de ocorrência de falhas de cavalgamento verificadas na FIGURA 22.

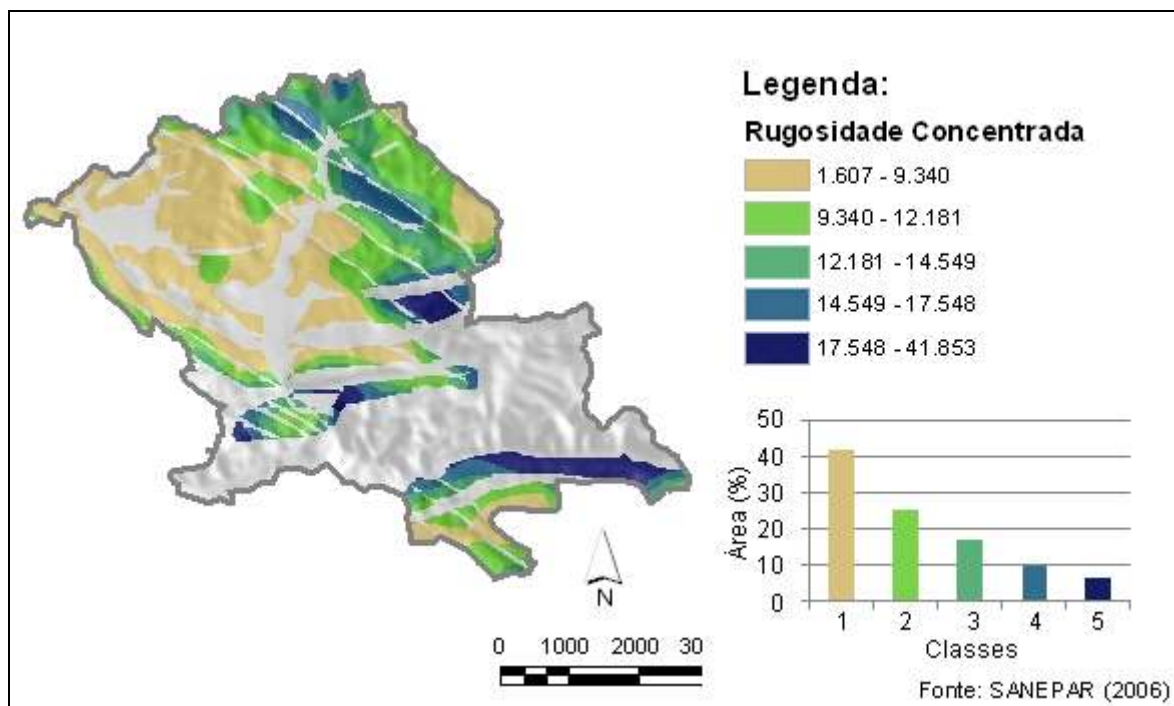


FIGURA 27 - Índice de rugosidade concentrada do relevo nos metadolomitos da Sub-bacia de Tranqueira.

7.1.6 Hidrografia

Os canais fluviais na sub-bacia de Tranqueira possuem, na área de ocorrência dos metadolomitos forte influência da estrutural dúctil-ruptil de direção principalmente NE-SW, condicionada por falhas, fraturas e contatos litológicos. Também os diques de diabásio possuem forte influência nas direções das drenagens, pois estas apresentam-se comumente paralelas quando os mesmos têm como encaixante os metadolomitos, e sobre eles quando se apresentam intrudidos em metassedimentos (BONACIM, 1996).

A região de Tranqueira está inserida em um sistema hidrográfico caracterizado por relativa estabilidade quanto ao gradiente hidráulico, pois a proximidade (cerca de 60 km), do nível de base regional dado pelo Rio Iguaçu, segundo Lima (1986, *apud* BONACIM, 1996), permite relativo equilíbrio entre o entalhamento e o alargamento. Tal equilíbrio, somado à possível existência de um

empilhamento mais delgado da Formação Capiu sobre o Complexo Gnáissico-Migmatítico, devido à proximidade do contato entre ambos, gera um maior reflexo dos falhamentos de direção N-S, E-W e NW-SE, na direção das drenagens principais, direções estas verificadas por KUZ (2003).

7.2 Sub-bacia de Fervida – Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR)

Os metadolomitos que ocorrem na sub-bacia de Fervida, próximos a região leste da área estudada, localizam-se no limite da BAI e da BAR (FIGURA 28), nas proximidades da sede do município de Colombo-PR e são conhecidos por ser uma das principais áreas de exploração hídrica para o abastecimento público da RMC.

A sub-bacia de Fervida pertence a BAR e é uma das áreas mais conhecidas regionalmente, pois as características geomorfológicas e geológicas propiciam a formação de fontes cársticas surgentes, conhecidas com “fervidas”, em alusão às águas que “fervem” do chão e agitam o sedimento (HINDI, 1999).

7.2.1 Geologia

Na sub-bacia de Fervida ocorrem litologias pertencentes à Formação Capiu do Grupo Açungui, com presença de rochas metadolomíticas e silicáticas cortadas por diques de diabásio. Ainda, estão presentes coberturas de idade quaternária pleistocênica da Formação Guabirota e sedimentos quaternários holocênicos (FIGURA 29).

A sub-bacia de Fervida ocupa aproximadamente 12,5 km², sendo 6,3 km² cobertos pelos metadolomitos da Formação Capiu. As demais litologias da Formação Capiu são representadas por filitos, quartzitos e, em menor proporção, por filitos grafitosos, metassiltitos e metamargas (FIGURA 29).

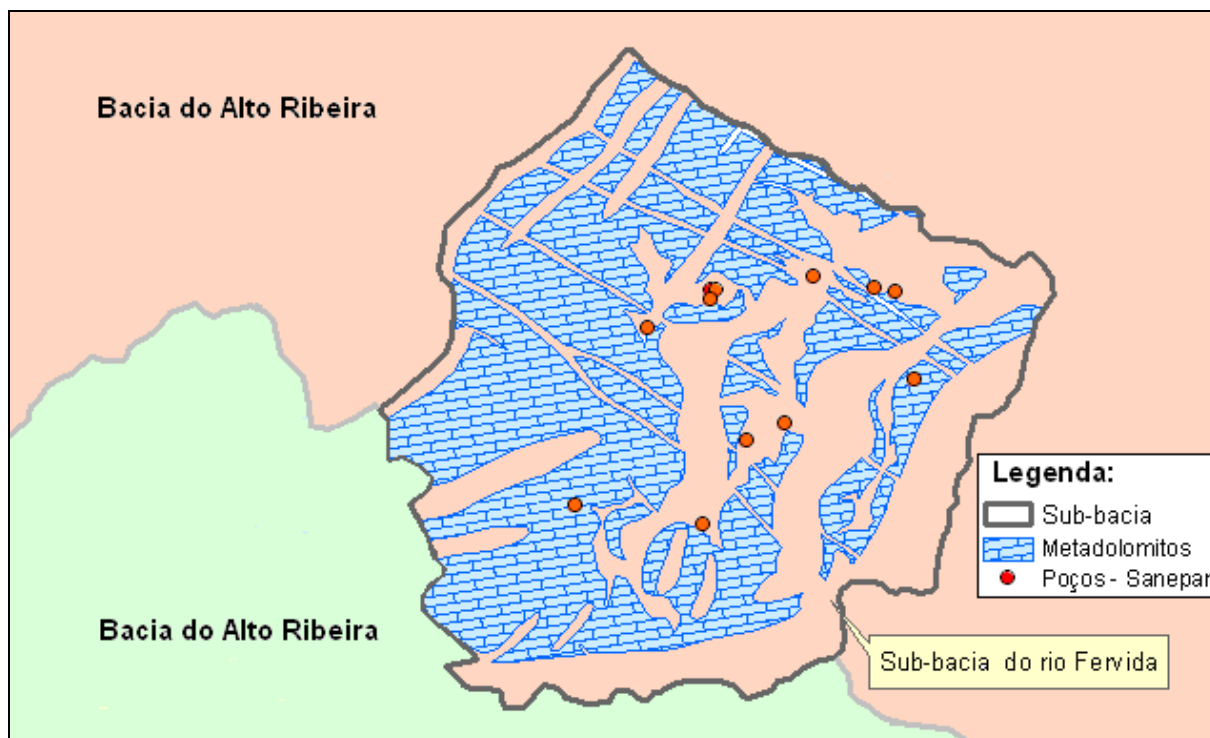


FIGURA 28 - Áreas de ocorrência de metadolomitos na sub-bacia de Fervida, e limite hidrográfico da BAI e BAR.

7.2.2 Características estruturais

A evolução geológica regional conforme Fiori (1994), inclui eventos cujos processos fraturaram, falharam e dobraram as formações do Grupo Açungui, incluindo as rochas da área estudada (FIGURA 30). Tal evolução, de caráter dúctil-rúptil, possui forte influência na paisagem e na configuração do carste e é tida como fator determinante para a atual configuração da paisagem e dos sistemas cársticos existentes.

As principais direções de fraturamentos encontradas nos raros afloramentos de metadolomitos, como o localizado no fundo de uma dolina (FIGURA 31), apresentam as seguintes direções: N25°-70°W e N30°-80°E (SANEPAR, 2005 e Hindi, 1997). Segundo Fiori (1994), todas estas fraturamentos foram reativados em vários eventos tectônicos posteriores, durante o Fanerozóico, especialmente a direção N40-50W na Era Mesozóica, e as direções NS e EW na Era Cenozóica.

As FIGURAS 32 e 33 apresentam respectivamente a fotografia aérea na escala 1:30.000, e os diagramas de roseta confeccionados a partir do traçado das lineações positivas (A) e negativas (B) nesta escala. As direções preferências das

cristas e vales, aproveitam preferencialmente os diques de diabásio de direção NW (cristas e vales) e o complexo falhamento e fraturamento de direção NE (vales).

Os diques de diabásio, segundo Hindi (1997), constituem o principal controle estrutural para o surgimento das fontes cársticas na região, e distribuem-se com orientação próxima N70E a N45W, quase ortogonais à direção das faixas metadolomíticas. Além de ser fator determinante na configuração dos sistemas hidrogeológicos, os diques também são determinantes para a conformação geomorfológica regional, pois formam cristas ou vales, dependendo da litologia encaixante e do estágio evolutivo do relevo.

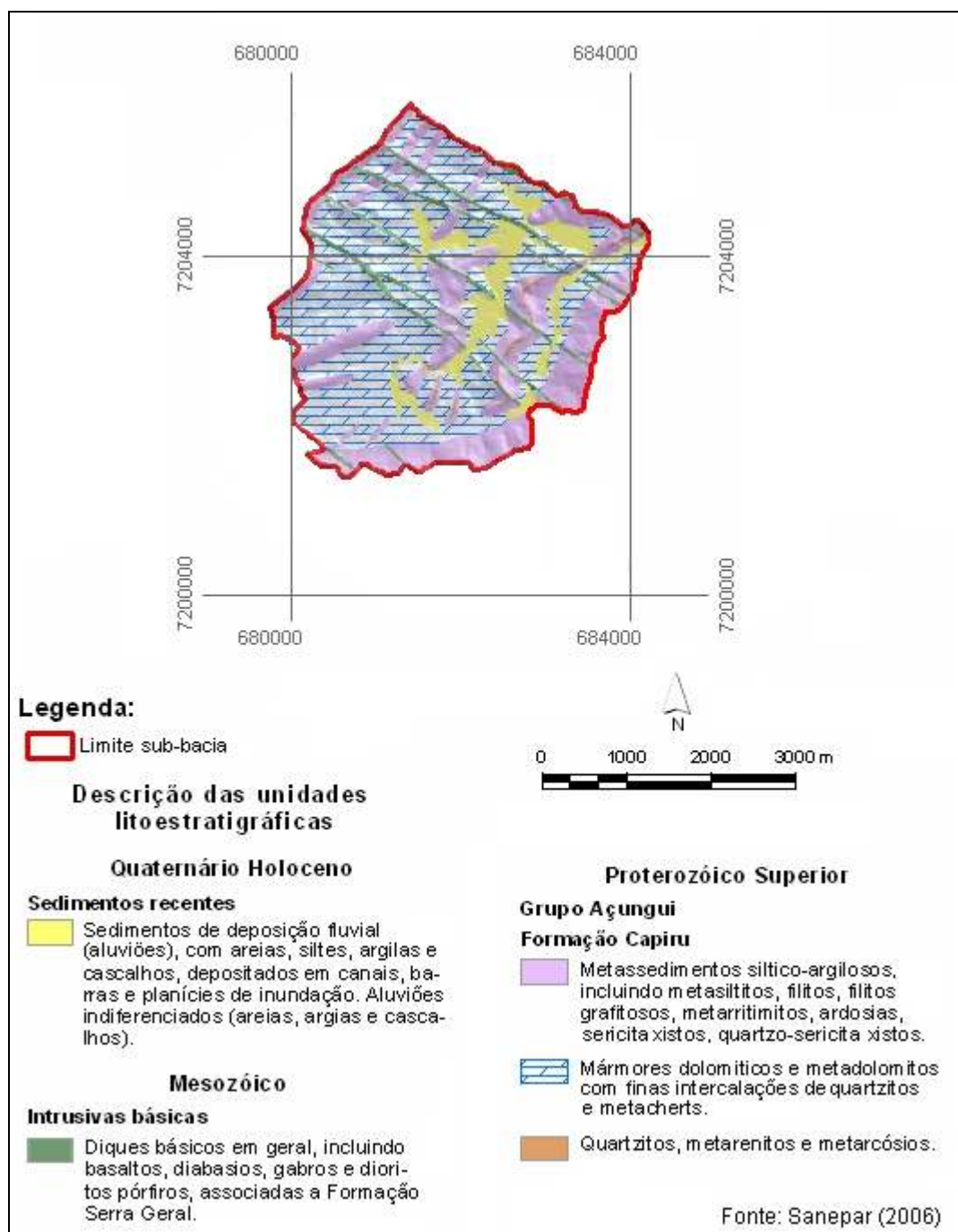


FIGURA 29 - Geologia da sub-bacia do Rio Fervida.

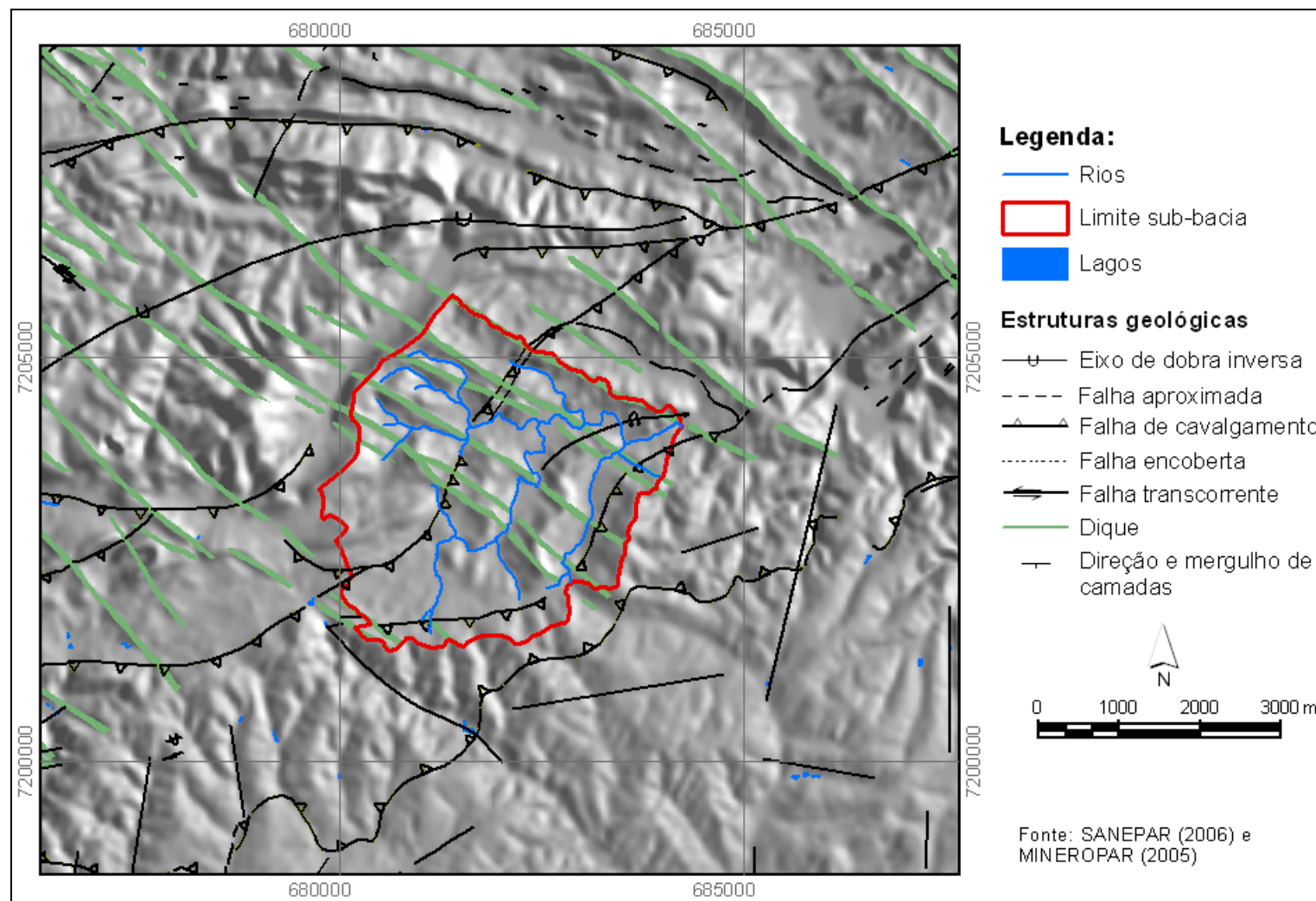


FIGURA 30 - Principais estruturas geológicas da sub-bacia do Rio Fervida.



FIGURA 31 - Afloramento de carbonato em fundo de dolina na sub-bacia do rio Fervida .



FIGURA 32 - Lineamentos estruturais traçados sobre fotografia aérea na escala 1:30.000 (Fonte: SUDERHSA, 2000) .

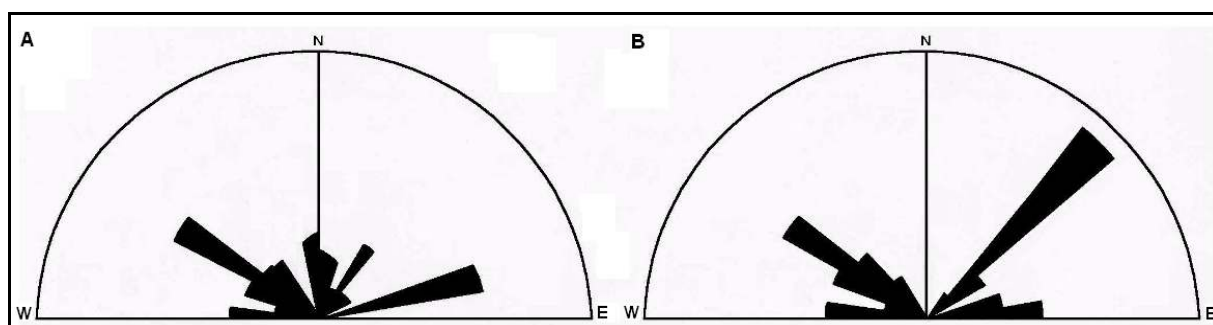


FIGURA 33 - Diagrama de rosetas de lineamentos estruturais positivos e (B) diagrama de rosetas de lineamentos estruturais negativos da região da sub-bacia do Rio Fervida.

7.2.3 Hipsometria

Os metadolomitos ocorrentes na sub-bacia de Fervida perfazem uma área total de 6,3 km², com intervalo altimétrico de ocorrência de 133m. As cotas mínimas

e máximas são respectivamente 916m e 1049m, com altitude média de 974m, e desvio padrão de 20m (FIGURA 34A). São valores intermediários entre os metadolomitos da BAI e da BAR, que apresentam médias altimétricas de 1011m e 993m, altitudes máximas de 1110m e 1132m e mínimas de 941m e 842m, respectivamente (FIGURA 34B).

Em comparação aos metadolomitos ocorrentes na sub-bacia de Tranqueira, a sub-bacia de Fervida possui cotas máximas e mínimas, média altimétrica e desvio padrão abaixo dos números encontrados em Tranqueira, porém os desvios padrão das médias altimétricas apresentam diferença de apenas 6m, fato derivado possivelmente da semelhança dos dados altimétricos (TABELA 6).

TABELA 6 - Dados altimétricos das sub-bacias de Tranqueira e Fervida.

Sub-bacia	Cota altimétrica máxima (m)	Cota altimétrica mínima (m)	Média altimétrica (m)	Desvio Padrão (m)
TRANQUEIRA	1125	955	1034	26
FERVIDA	1049	916	974	20

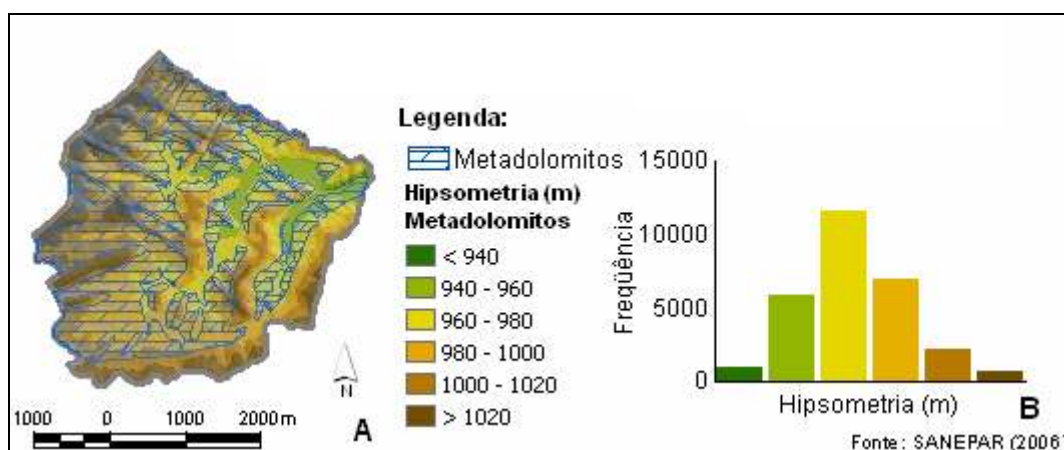


FIGURA 34 - Hipsometria e histograma de frequência altimétrica da sub-bacia de Fervida.

7.2.4 Declividade

Dos cerca de 6,3 km² de área de ocorrência de rochas metadolomíticas, 8,8% estão em intervalos de declividade superiores a 30%, sendo que 1,4% encontram-se em intervalos superiores a 45% de declividade. Apresentado um pequeno acréscimo em relação a sub-bacia de Tranqueira, já o intervalo menor que

5% representa 14,5%. Desta forma, o intervalo de declividades entre <5 e 30%, representa cerca de 91,2% bastante próximo aos 95,4 % verificado na sub-bacia de Tranqueira nesse intervalo (FIGURA 35A e TABELA 7 e 8).

O histograma de frequência de área por intervalo de declividade apresenta geometria assimétrica, com aumento da frequência concomitante ao aumento do intervalo de declividade até 30%, semelhante aos encontrados na BAI e na sub-bacia de Tranqueira (FIGURA 35B).

A comparação dos dados altimétricos desenvolvidos no presente trabalho com o mapa geológico e de feições cársticas elaborado por Hindi (1997), permite observar que a localização de feições exocársticas se dá por toda a faixa de ocorrência de metadolomitos, porém as áreas com declividades inferiores a 30% possuem maior ocorrência.

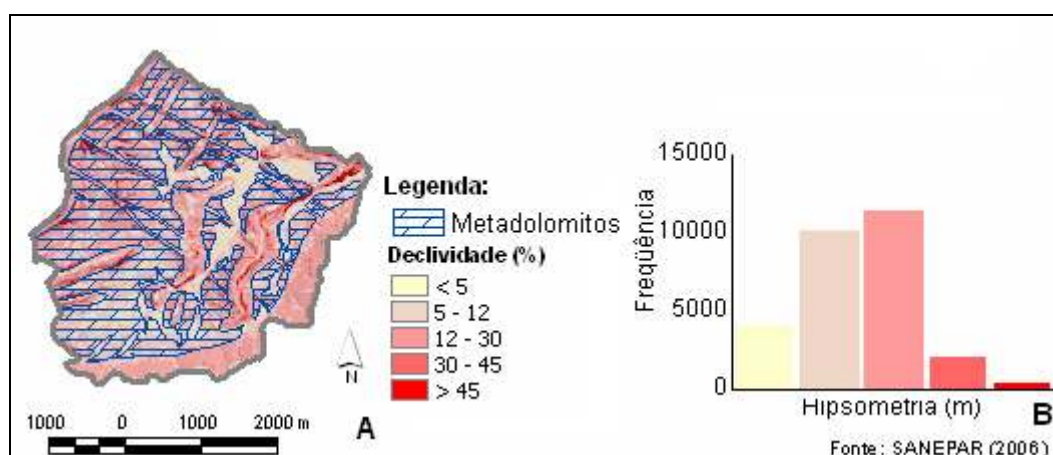


FIGURA 35 - Declividade e histograma de frequência de declividade da sub-bacia do Rio Fervida.

TABELA 7 - Intervalos de declividade por área na sub-bacia do Rio Fervida.

Metadolomitos da sub-bacia do Rio Fervida		
Declividade (%)	Área (km ²)	Área (%)
<5	9,2	14,5
5 - 12	22,7	35,7
12 - 30	26	41
30 - 45	4,7	7,4
>45	0,9	1,4

TABELA 8 - Porcentagem de área por intervalo de declividade da BAI, BAR e sub-bacia do Rio Fervida.

Declividade (%)	Tranqueira área (%)	Fervida área (%)
<5	21	14,5
5 - 12	36	35,7
12 - 30	37,6	41
30 - 45	4,8	7,4
>45	0,6	1,4

7.2.5 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)

Os metadolomitos da sub-bacia do Rio Fervida possuem de forma similar a sub-bacia de Tranqueira e a BAI, percentagem de área bastante significativa nos intervalos de baixa concentração da rugosidade, que variam de 1.607 a 12.181 (TABELA da FIGURA 36). Porém o acréscimo de área da classe 1 para a 2, ao contrário do que ocorre em Tranqueira e na BAI, mostra a existência de um relevo um pouco mais rugoso (FIGURA 37), e conforme pode ser observado no gráfico da FIGURA 37, semelhante neste intervalo (classe 1 até 2), ao que ocorre na BAR.

Entre o intervalo de índice de concentração da rugosidade (ICR) média e alta de 12.181 e 14.549 até o intervalo de “muito alta” rugosidade concentrada de 17.548 – 41.853, a percentagem de área decresce, a exemplo do que ocorre na BAI.

As feições exocársticas e as fontes cársticas ocorrem por praticamente toda a área de ocorrência de metadolomitos, concentrando se principalmente nas áreas mais aplainadas.

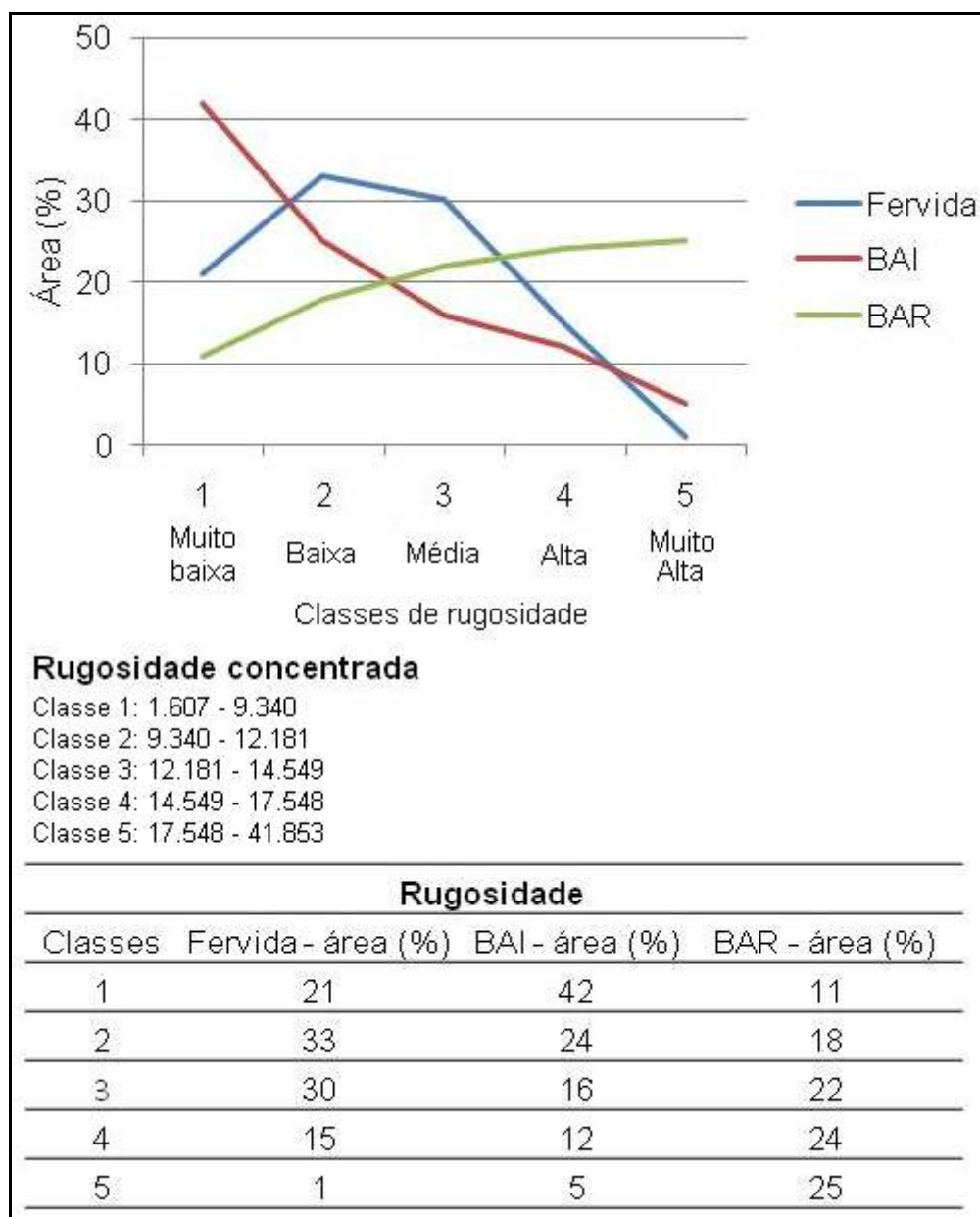


FIGURA 36 - Gráfico e TABELA da percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada da Sub-bacia de Fervida, da BAI e da BAR.

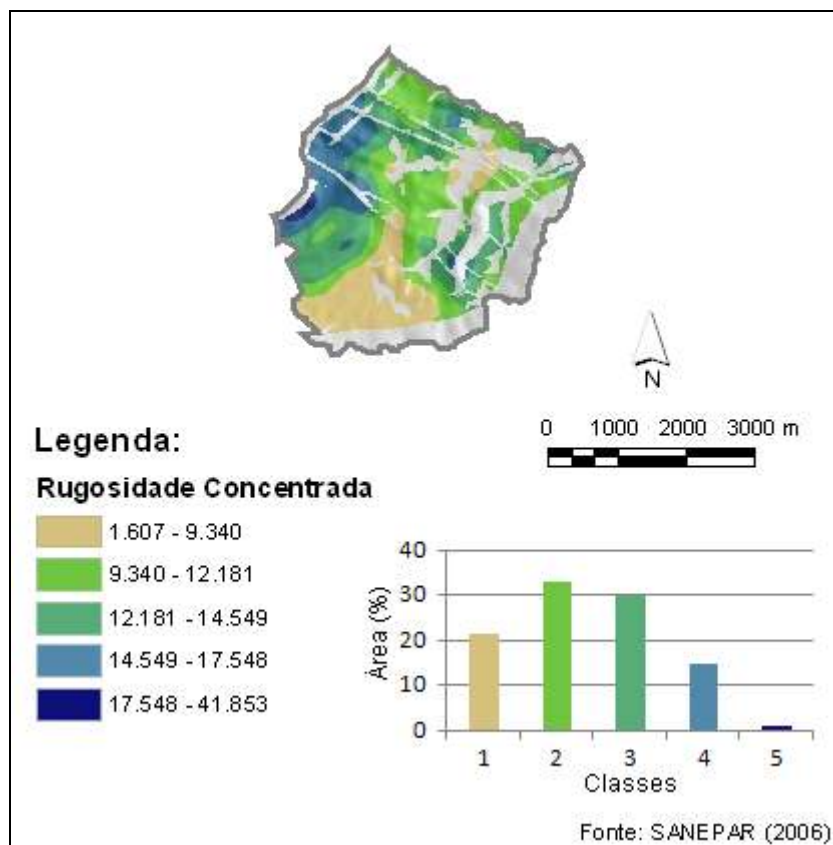


FIGURA 37 - Índice de rugosidade concentrada do relevo da Sub-bacia de Fervida.

7.2.6 Hidrografia

Os metadolomitos da sub-bacia do Rio Fervida possuem características hidrográficas influenciadas principalmente pelas discontinuidades estruturais de direções próximas a NE, e pelos diques de diabásio de direção NW, que conferem um padrão de drenagem sub-retangular. Também é observada a presença de anomalias de drenagem, tais como mudanças abruptas de direção (alta angularidade), curvas anômalas, cotovelos, vales secos, entre outros (FIGURA 30).

O Rio Fervida e seus tributários se desenvolvem, principalmente, sobre depósitos aluvionares e sobre os metadolomitos que representam os baixos topográficos. A densidade de drenagem, como ocorre tipicamente em áreas metadolomíticas carstificadas, é baixa e, devido à sazonalidade climática, litologia e pedologia, alguns dos rios tributários do Rio Fervida são intermitentes.

A drenagem atual tem como nível de base local o dique de diabásio na cota altimétrica de 916m na foz da sub-bacia. Porém, com base em análises de campo, e

da figura de hipsometria da área, há indícios (aluviões abandonados e anomalias de drenagem) de que a drenagem precedente à atual tinha como nível de base uma das cabeceiras da sub-bacia, na cota altimétrica próxima a 990m, no limite entre as sub-bacias do Rio Fervida e Tumiri. Segundo Hindi (1997), atualmente a conexão hídrica entre estas sub-bacias ocorre por fluxo subterrâneo, observada devido à secagem de uma fonte cárstica na sub-bacia do Rio Fervida, por conta do bombeamento de poços na sub-bacia do Rio Tumiri.

7.3 Sub-bacia de Bacaetava – Bacia do Alto Rio Ribeira (BAR)

Situada no sistema hidrográfico da BAR, a sub-bacia do rio Bacaetava possui aproximadamente 21,6 km² de área, onde ocorrem 5 (cinco) cavernas, sendo a mais famosa, a caverna de Bacaetava. Nesta, a beleza cênica, o fácil acesso e a infra-estrutura permanente de visitação proporcionam um grande fluxo turístico.

A sub-bacia de Bacaetava está na zona limítrofe regional de quatro municípios da RMC (Almirante Tamandaré, Bocaiúva do Sul, Colombo e Rio Branco do Sul), coincidente com a zona limítrofe das bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira (FIGURA 38).

7.3.1 Geologia

Na sub-bacia do Rio Bacaetava ocorrem litologias pertencentes às Formações Capiu do Grupo Açungui e Perau do Grupo Setuva, com presença de rochas metadolomíticas e silicáticas cortadas por diques de diabásio da Formação Serra Geral, cobertas por sedimentos quaternários holocênicos (FIGURA 39).

Dos cerca de 21,6 km² da área de estudo, 14 km² equivalem a metadolomitos da Formação Capiu, 6,6 km² às demais litologias das Formações Capiu e Perau, representadas, principalmente, por filitos e quartzitos. Os diques de diabásio da Formação Serra Geral representam cerca de 1km².



FIGURA 38 - Situação hidrográfica da sub-bacia de Bacaetava na zona limítrofe da BAI e da BAR.

7.3.2 Características estruturais

A exemplo das demais sub-bacias estudadas, a sub-bacia do Rio Bacaetava está inserida no contexto estrutural do Grupo Açungui, com complexo sistema de fraturas, falhas e dobras, descrito por Fiori (1994). Tal evolução de caráter dúctil-rúptil possui forte interferência na paisagem, como por exemplo, a Sinforme do Morro Grande, que constitui uma crista alongada formando o limite sul da sub-bacia de Bacaetava (FIGURA 40).

Segundo Bahniuk (2007), os principais alinhamentos e lineações positivos e negativos (altos e baixos topográficos), apresentam direção preferencial para N30-50W associadas à intrusões de diques de diabásio, E-W associadas ao flanco norte da Sinforme do Morro Grande, e secundariamente N20-30E associadas à falha da Lancinha. Todos provenientes dos eventos regionais descritos por Fiori (1994). Os diagramas de roseta mostram as principais direções dos lineamentos e alinhamentos regionais (FIGURA 41).

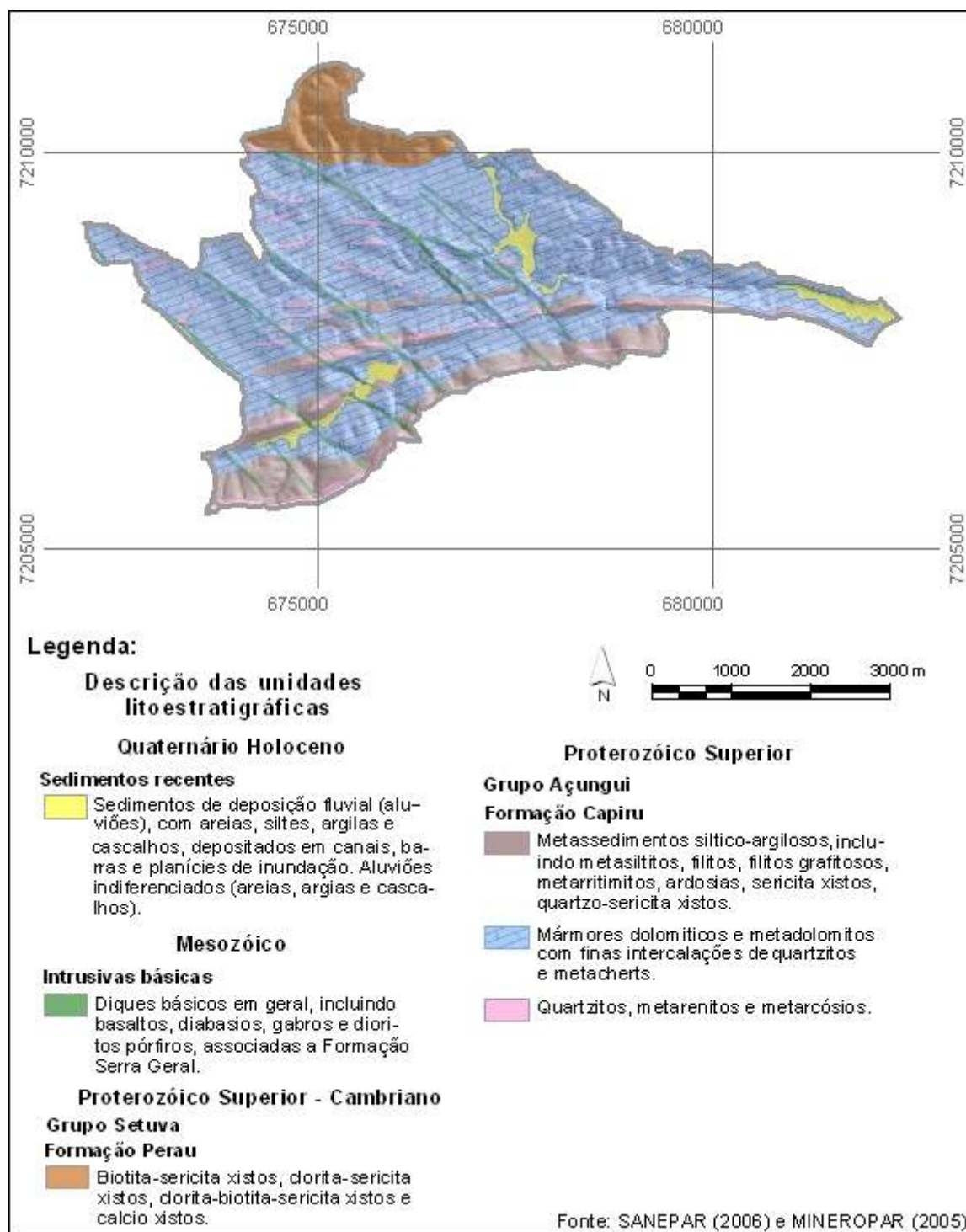


FIGURA 39 - geologia da sub-bacia do rio Bacaetava.

Segundo Fiori (1994), todas estas direções foram reativadas em vários eventos tectônicos, durante o Fanerozóico, principalmente a direção N40-50W na Era Mesozóica, e as direções NS e EW na Era Cenozóica.

As FIGURAS 42A e 42B, mostram o deslocamento do dique de diabásio (N10W/74SW) provocado por falha de direção próxima NW, de idade Mesozóica (FIORI, 1994).

Bahniuk (2007), ao investigar os controles geológicos da carstificação na Formação Capiru observou na gruta de Bacaetava, direções preferenciais para o desenvolvimento dos processos de carstificação, segundo as direções estruturais EW, N20-30E e N30-50W, e concluiu:

1. As direções das fraturas EW são as mesmas do acamamento e da abertura da caverna, onde há um predomínio horizontal da dissolução.
2. As fraturas abertas de direção N20-30E estão relacionadas a fendas de dissolução, onde há um predomínio horizontal da dissolução que permite a ligação entre os salões superior e inferior, onde também está preferencialmente instaurada a drenagem atual.
3. As fraturas fechadas N30-50W são responsáveis pela ornamentação da gruta.

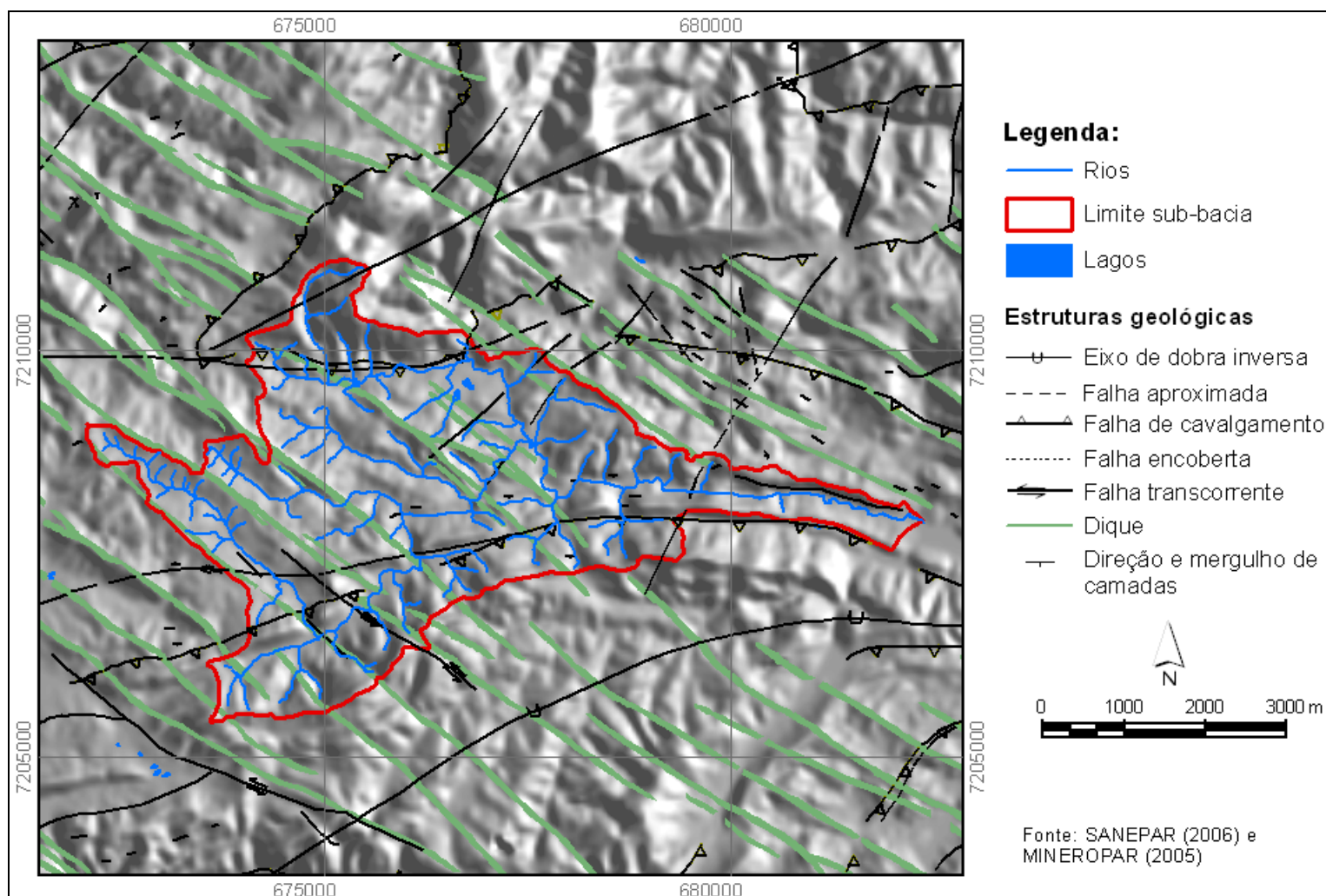


FIGURA 40 - Principais estruturas geológicas presentes na região da sub-bacia do Rio Bacaetava.

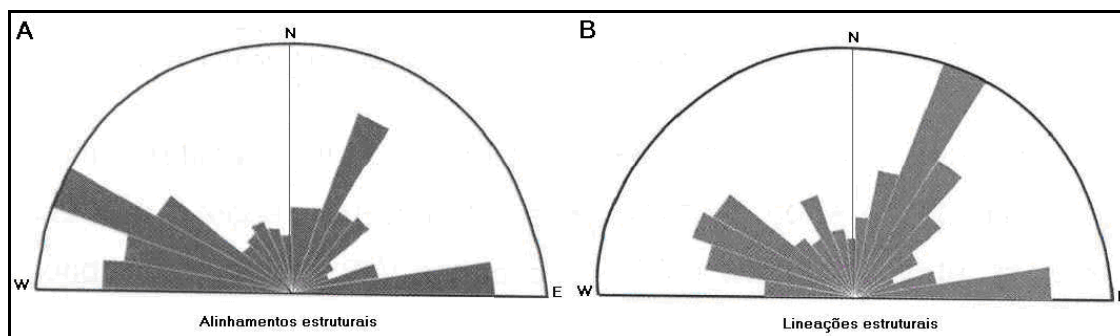


FIGURA 41 - Diagrama de rosetas demonstrando as direções dos principais lineamentos e alinhamentos estruturais da região da sub-bacia de Bacaetava (Fonte: BAHNIUK, 2007).



FIGURA 42 - A) Foto do dique de direção e mergulho N10W/74SW. B) Traçado esquemático ressaltando alguns aspectos estruturais. Reparar a não continuidade do dique no lado inferior direito da imagem B, sinalizada com ponto de interrogação.

7.3.3 Hipsometria

Os metadolomitos ocorrentes na sub-bacia do Rio Bacaetava variam da cota altimétrica mínima de 893m até a cota máxima de 1125m, com altitude média de 1018m. A amplitude altimétrica, de mais de 220m, permite a exposição de metadolomitos num intervalo altimétrico que expõe toda a faixa de ocorrência dos metadolomitos da BAI, que variam da cota altimétrica 935m até a cota 1125m, e 60% da faixa de ocorrência dos metadolomitos ocorrentes na BAR, que variam no intervalo cota altimétrico de 1132m a 842m, na área de estudo.

A variabilidade dos dados altimétricos da sub-bacia de Bacaetava também é observada no seu desvio padrão, de 40m, o dobro do encontrado em Fervida, de 20m, e quase o dobro do encontrado em Tranqueira de 26m (TABELA 9).

O histograma de frequência altimétrica dos metadolomitos possui distribuição assimétrica. O intervalo altimétrico de maior frequência abrange 88% da área e está entre as cotas altimétricas 960 e 1080m. Já as áreas com altitudes superiores a 1120m representam 4,7% da área, e as abaixo de 960m cobrem 7,3% (FIGURA 43A).

TABELA 9 - Dados altimétricos das sub-bacias dos rios Tranqueira, Fervida e Bacaetava.

Sub-bacia	Cota altimétrica máxima (m)	Cota altimétrica mínima (m)	Média altimétrica (m)	Desvio padrão (m)
Tranqueira	1125	955	1034	26
Fervida	1049	916	974	25
Bacaetava	1125	893	1018	40

Em relação à ocorrência de feições cársticas, além da existência de feições exocársticas, há também a exposição do endocarste (cavernas) em zona vadosa, fato não descrito nas demais sub-bacias estudadas. Com base na análise do histograma altimétrico, foi possível identificar três compartimentos de relevo com níveis diferenciados de exposição dos metadolomitos carstificados (FIGURA 43B).

O primeiro compartimento, localizado no baixo curso da sub-bacia do Rio Bacaetava, compreende cerca de 4km² de metadolomitos e ocorre entre as cotas altimétricas 893 e 1060m (FIGURA 43C), onde há a exposição de três cavernas com

cota altimétrica média de 916m. O segundo está ocupado por 5,5 km² de metadolomitos, e varia entre as cotas altimétricas 980 e 1060m, e apesar de possuir duas cavernas na cota altimétrica média de 990m, na zona limítrofe com o baixo curso, possui ocorrência predominante de feições exocársticas (FIGURA 43D). O último compartimento, situado no alto curso, possui cerca de 4,5 km² de metadolomitos, e ocorre entre a faixa altimétrica 1020 e 1125m, onde ocorrem somente feições exocársticas (FIGURA 43E).

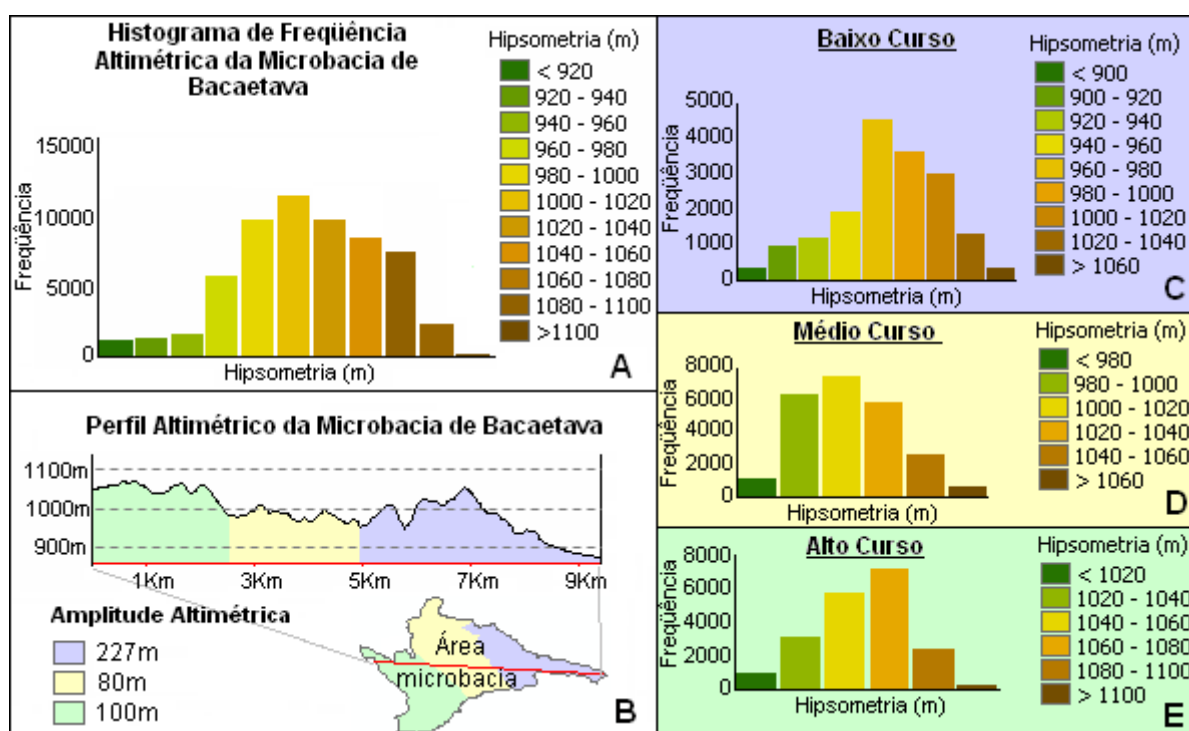


FIGURA 43 - Histogramas de frequência altimétrica: (A) sub-bacia de Bacaetava; (C) baixo curso da sub-bacia de Bacaetava; (D) médio curso da sub-bacia de Bacaetava; e (E) alto curso da sub-bacia de Bacaetava. (B) Perfil de relevo da sub-bacia de Bacaetava.

7.3.4 Declividade

O forte regime erosivo imposto pelo rio Ribeira, somado ao controle litoestrutural, possibilitou o desenvolvimento de uma paisagem caracterizada por vertentes com declividades acentuadas em relação às sub-bacias de Tranqueira e Fervida. Dos 14 km² de área de ocorrência de metadolomitos na sub-bacia de Bacaetava, 13% estão em intervalos de declividade entre 30 e 45%, e 5% em intervalos superiores a 45%.

Em termos comparativos, Bacaetava possui, percentualmente, duas vezes mais área em intervalos superiores a 30% de declividade que a sub-bacia do rio Fervida, e três vezes mais que Tranqueira. A comparação, em escala regional, também caracteriza Bacaetava como uma área de relevo acidentado, típico da BAR. Os intervalos inferiores a 30% de declividade representam 82% da área da sub-bacia, sendo que o intervalo entre 12 e 30%, a exemplo do que ocorre na BAR, mais de 40% da área total, como pode ser observado na TABELA 10. Já as declividades inferiores a 12% representam 32% da área e estão associadas principalmente aos compartimentos de relevo existentes no médio e alto curso do Rio Bacaetava (FIGURA 44A).

TABELA 10 - Área por intervalo de declividade dos metadolomitos da sub-bacia do Rio Bacaetava.

Metadolomitos da sub-bacia do Rio Bacaetava		
Declividade (%)	Área (km²)	Área (%)
<5	1,3	09
5 - 12	3,1	23
12 - 30	6,9	50
30 - 45	1,7	13
>45	0,7	5

Os histogramas de frequência de declividade, por área, para cada compartimento de relevo da sub-bacia de Bacaetava, apresentam geometria assimétrica para as áreas do médio e alto curso, mais plana e simétrica para o baixo curso, que possui declividades mais acentuadas (FIGURAS 44B, C e D).

O compartimento de relevo localizado no baixo curso do Rio Bacaetava apresenta 26,56% de sua área em declividades superiores a 30%, enquanto o médio e alto curso apresentam respectivamente 13,55 e 12,06%, praticamente a metade do percentual encontrado no baixo curso (FIGURAS 44B, C e D).

Das cinco cavernas existentes, três ocorrem no baixo curso, em áreas com declividade média em torno de 63%, as outras duas localizam-se no limite deste com o médio curso, e estão em áreas com declividade média de 16%. Já as feições exocársticas ocorrem, com maior frequência, em declividades de até 30%, principalmente no médio e alto curso.

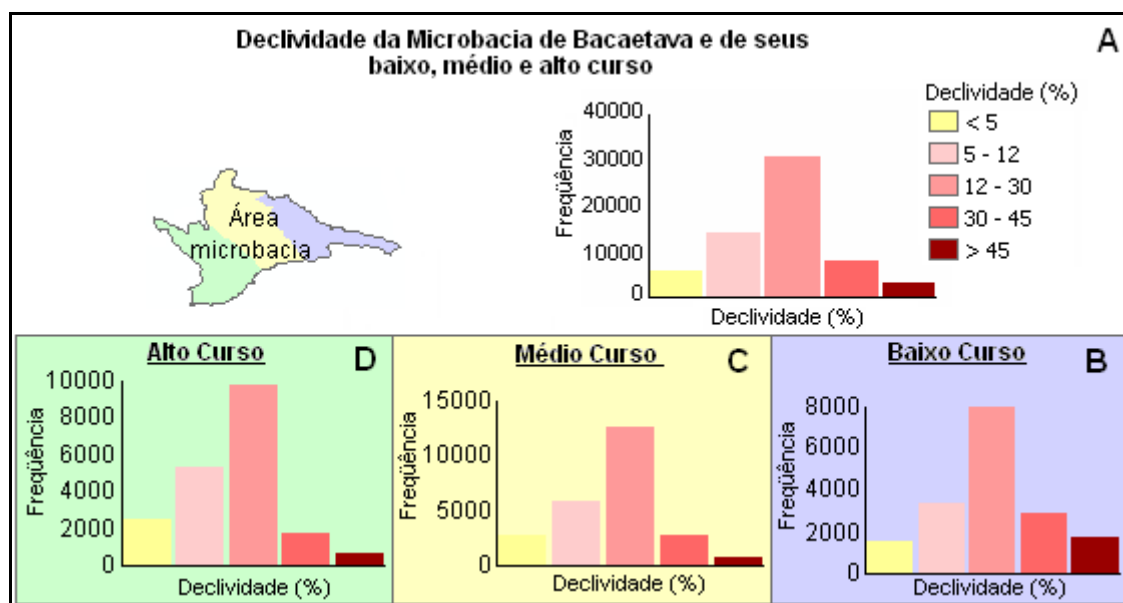


FIGURA 44 - Histogramas de frequência de declividade por área: (A) sub-bacia de Bacaetava; (B) baixo curso da sub-bacia de Bacaetava; (C) médio curso da sub-bacia de Bacaetava; e (D) alto curso da sub-bacia de Bacaetava.

7.3.5 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)

A sub-bacia do Rio Bacaetava possui 44% de sua área nos intervalos de ICR mais elevados, entre 14.549 e 41.853, estas áreas localizam-se principalmente em sua porção sul, nas proximidades da falha do Morro Grande. A pronunciada ocorrência de áreas com maior rugosidade concentrada, como pode ser observado no gráfico da FIGURA 45, segue a linha observada na BAR, onde o aumento da área abrangida aumenta entre as classes de rugosidade concentrada 4 e 5.

Além da ocorrência acentuada de intervalos de rugosidade concentrada mais elevados, chama a atenção o aumento de área entre as classes 1 e 2, que juntas representam 36% da área, e se concentram no médio e alto curso desta sub-bacia (FIGURA 46).

O aumento de área entre as classes 1 e 2 e 4 e 5, acompanham a tendência do gráfico da BAR, porém a diminuição de área entre as classes 2 e 3, de índice rugosidade concentrada intermediária, acompanha a distribuição verificada na BAI. O gráfico da FIGURA 46 apresenta esta distribuição, que geometricamente assemelha-se ao gráfico de distribuição de área por classe de rugosidade concentrada da sub-bacia de Fervida até a classe 4, porém com forte incremento da classe 5.

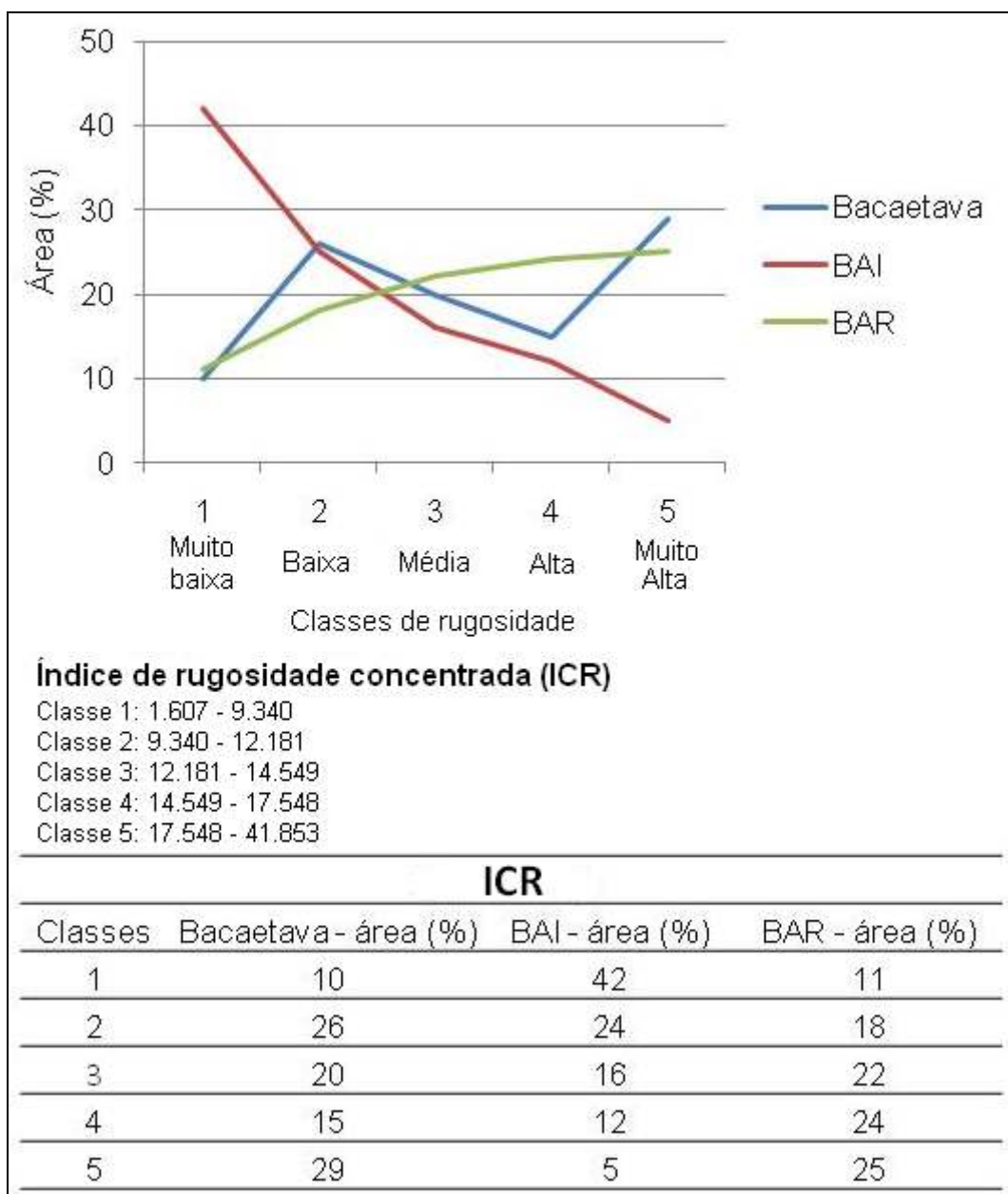


FIGURA 45 - Gráfico e TABELA da percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada do relevo da Sub-bacia de Bacaetava, da BAI e da BAR.

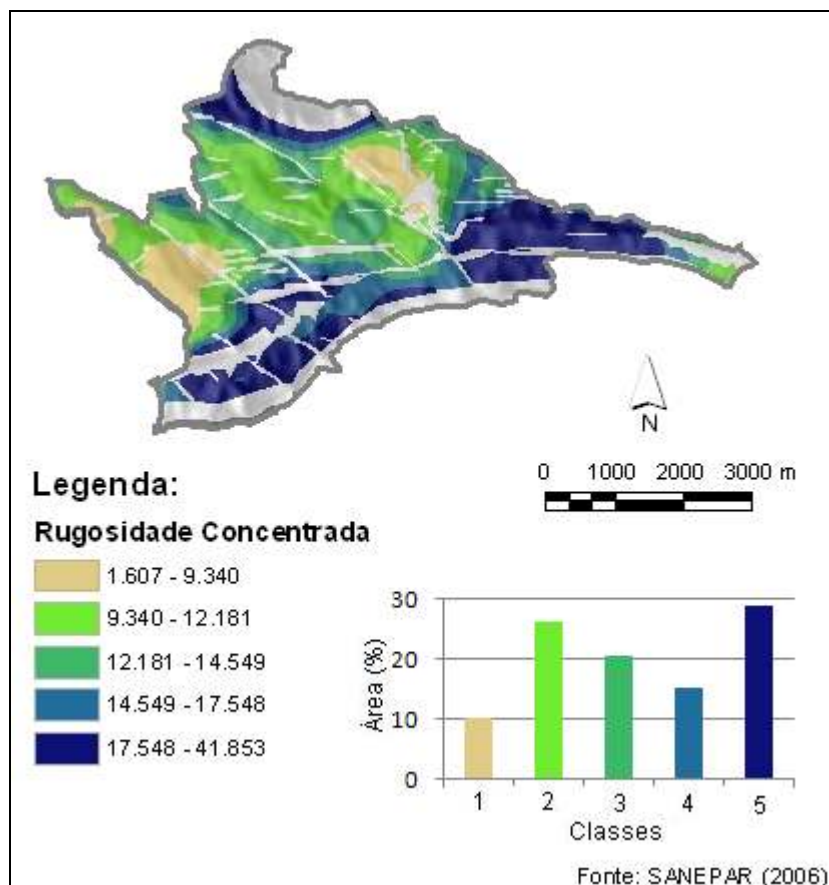


FIGURA 46 - Rugosidade concentrada do relevo da Sub-bacia de Bacaetava.

7.3.6 Hidrografia

As drenagens da sub-bacia de Bacaetava possuem direções fortemente influenciadas pelas discontinuidades estruturais e litológicas da Formação Capiru, sendo as principais direções dos canais: E-W, NW-SE imposta pelos diques de diabásio e NE, impostas pelas discontinuidades estruturais e litológicas (FIGURA 40).

O controle estrutural imposto a drenagem permite a instauração de um padrão de drenagem sub-retangular, com anomalias de drenagem, assim como ocorre na sub-bacia do Rio Fervida, pois, são comuns mudanças abruptas de direção (alta angularidade), curvas anômalas e cotovelos.

8 RESULTADOS

8.1 Controles geológicos e relevo

Admitir a existência de um contexto geológico e geográfico comum até a abertura do Vale do Ribeira, principalmente em relação à evolução de Superfícies de Aplainamento, permite inferir que as três sub-bacias estudadas tiveram as mesmas condições exogenéticas para o desenvolvimento da espeleogênese. No entanto, a mudança no regime erosivo, com a abertura do Vale do Ribeira a partir do Mioceno Inferior, impôs um regime erosivo mais acentuado nas sub-bacias de Bacaetava e Fervida em relação ao verificado na sub-bacia de Tranqueira drenada pela Bacia do Alto Iguaçu (BAI) (FIGURA 47).

Os controles litoestruturais observados na paisagem de cada sub-bacia são semelhantes, porém, as especificidades das variáveis geológicas, somadas às características do relevo e sua relação com os processos erosivos, permitem um arranjo espacial particular, que podem promover a formação de determinado tipo de feição cárstica.

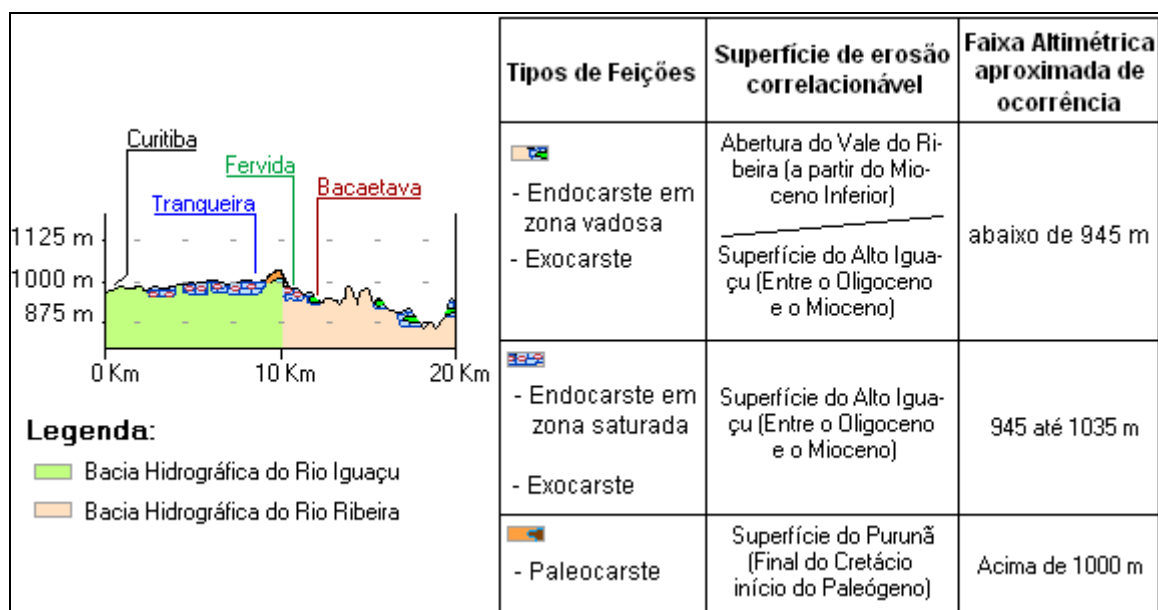


FIGURA 47 - Perfil esquemático mostrando a localização das sub-bacias estudadas, o tipo de feições cársticas normalmente ocorrente, e a paleosuperfície correlacionável.

Pode-se verificar a existência de um relevo relativamente plano nas sub-bacias dos rios Fervida e Tranqueira, onde conforme pode ser observado na FIGURA 5 há controles litoestruturais impostos por faixas de rochas metassedimentares e diques de diabásio que proporcionam níveis de base locais.

Na sub-bacia de Tranqueira os diques de diabásio quando intrudidos em metadolomitos são transpostos pelas drenagens na direção próxima N-S, porém quando intrudidos em metassedimentos, normalmente constituem vales onde os rios se encaixam, possibilitando a transposição das faixas metassedimentares pelas drenagens. Já as falhas de cavalgamento de direção próxima E-W e NE também são transpostas pelas drenagens na direção próxima N-S e assim, como os diques de diabásio funcionam como níveis de base locais.

Na sub-bacia de Fervida os diques de diabásio são bastante recorrentes e figuram como a principal componente da conformação geomorfológica local, pois dependendo da litologia encaixante apresentam-se como cristas ou vales alongados de direção NW (HINDI, 1997), a alternância entre cristas e vales se dá de forma bastante expressiva, com diques variando altimetricamente cerca de 134m, da cota 1050m quando intrudidos em metadolomitos a 916m, quando intrudidos em faixas de rochas metassedimentares.

Já na sub-bacia de Bacaetava, os controles litoestruturais são mais efetivos no seu alto e médio curso, onde há predominância de diques de diabásio e faixas de rochas metassedimentares que atuam como barreiras ao entalhamento vertical das drenagens, condicionando níveis de base locais no interior da sub-bacia. No compartimento coincidente com o baixo curso do Rio Bacaetava, onde a drenagem é paralela às barreiras litoestruturais, e os diques possuem espessura e contiguidade incipiente, os canais possuem forte entalhamento vertical.

A variabilidade dos dados altimétricos e a geometria dos histogramas, também mostram semelhanças entre as sub-bacias de Tranqueira e Fervida, onde os valores de desvio padrão encontrados são, respectivamente, 26 e 20m, bem abaixo do encontrado para a sub-bacia de Bacaetava, de 40m. A configuração simétrica dos histogramas de frequência altimétrica de Tranqueira e Fervida também difere do histograma gerado para a sub-bacia de Bacaetava, onde a análise dos dados permite identificar três compartimentos de relevo.

A faixa altimétrica preferencial de ocorrência das feições endocársticas e exocársticas entre aproximadamente 920 e 1040m é próxima a faixa de ocorrência de carstes correlatos à evolução da Superfície Alto Iguaçu, descritos por Rebelo *et al* (2007) entre 945-1035m, o que corrobora a hipótese de um contexto geológico, climático e geomorfológico comum de carstificação nas três sub-bacias.

Em relação às declividades, a assimetria gráfica dos histogramas caracteriza as sub-bacias de Tranqueira e Fervida, mais planas, ambas com mais de 90% de suas áreas com declividades inferiores a 30%, fato também observado nos histogramas que representam o médio e alto curso da sub-bacia de Bacaetava, ambos com mais de 85% de suas áreas em intervalos inferiores a 30%.

O histograma que representa a totalidade das declividades da sub-bacia de Bacaetava possui geometria simétrica, com cerca de 18% de sua área com declividades superiores a 30% (TABELA 1), simetria também observada no histograma que representa seu baixo e curso.

As feições exocársticas ocorrentes em Tranqueira estão preferencialmente em metadolomitos com declividades inferiores a 12%, enquanto em Fervida e Bacaetava onde o relevo é mais acidentado, estas feições ocorrem também em declividades até 30%. Das cinco cavernas ocorrentes em Bacaetava três localizam-se em áreas com declividade média superior a 60% e duas em declividade média de 16%.

8.2 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) e feições cársticas

Os metadolomitos entre a faixa altimétrica 920-1040m hospedam a maioria das feições cársticas presentes nas três sub-bacias estudadas, incluindo quatro das cinco cavernas presentes na sub-bacia de Bacaetava (TABELA 12). Esta faixa altimétrica é bastante próxima a faixa altimétrica 945-1035m apontada por Rebelo *et al* (2007), como área de ocorrência de carstificação correlata ao desenvolvimento da Superfície Alto Iguaçu, na região estudada.

TABELA 12 - Dados referentes às cavernas ocorrentes na sub-bacia do Rio Bacaetava

Nome da caverna	Município de ocorrência	Litologia de ocorrência	Altitude (m)
Campina dos Pintos	Rio Branco do Sul	Calcário Dolomítico	994
Y	Colombo	Calcário Dolomítico	987
Escura	Colombo	Calcário Dolomítico	925
Cinco Níveis	Colombo	Calcário Dolomítico	925
Bacaetava	Colombo	Calcário Dolomítico	898

As diferentes dinâmicas erosivas da BAI e da BAR sobre o carste correlato ao desenvolvimento da Superfície Alto Iguaçu, é verificado no gráfico da FIGURA 48, onde observa-se que o percentual de área diminui com o aumento do índice de concentração da rugosidade (ICR) na BAI, enquanto na BAR verifica-se o aumento de percentagem de área concomitante ao aumento do ICR.

Enquanto não se observa a existência de cavernas nos metadolomitos da Superfície do Alto Iguaçu na BAI, que possui relevo menos rugoso e relativamente mais plano. Em contrapartida é fato o aumento no número de cavernas com o aumento do ICR na BAR. Das 47 cavernas existentes no intervalo de carstificação correlato ao desenvolvimento desta Superfície, 5 estão nos intervalos de baixa rugosidade, 8 no intervalo médio e 34 nos intervalos de alta concentração da rugosidade (FIGURA 5).

Em análise por escala de sub-bacias, a ocorrência de metadolomitos com carstificação correlata à Superfície Alto Iguaçu também foi individualizada, e conforme pode ser observado no gráfico da FIGURA 49, a distribuição percentual de área por intervalo de rugosidade concentrada se dá segundo a tendência observada nos metadolomitos com carstificação correlata ao desenvolvimento da Superfície Alto Iguaçu na BAI e na BAR em escala regional (FIGURA 49).

A sub-bacia de Tranqueira possui distribuição de área por intervalo de rugosidade concentrada semelhante à observada na BAI, com percentagem de área maior nos intervalos de baixa rugosidade, com diminuição de área acompanhando o aumento do ICR (FIGURA 49).

Na sub-bacia de Fervida, a distribuição de área acompanha a BAR nos intervalos de classe de baixa, já no intervalo de classe média rugosidade concentrada possui distribuição intermediária, não se enquadrando na BAI ou na BAR. Em relação aos intervalos de classe alta e muito alta, observa-se a tendência

de distribuição semelhante à verificada na BAI.

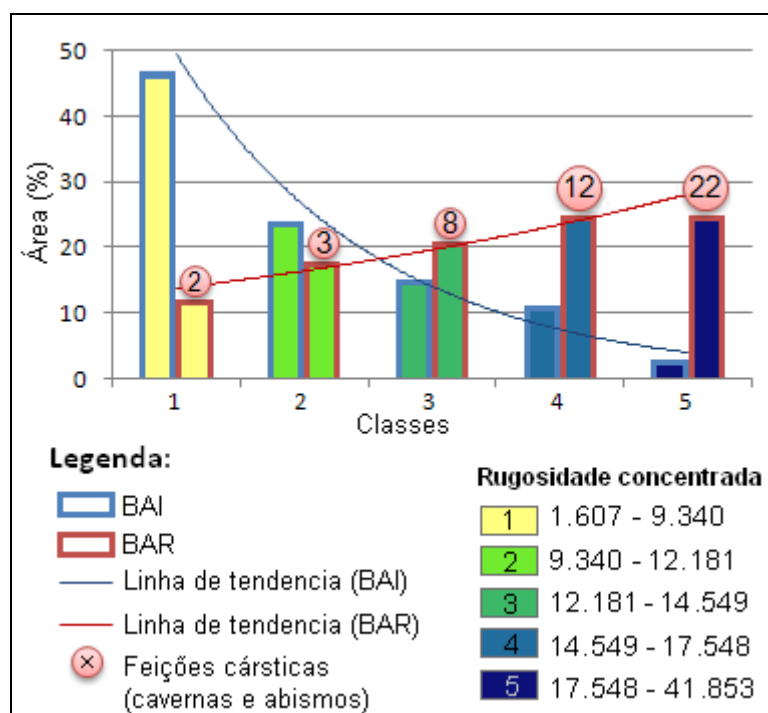


FIGURA 48 - Gráfico demonstrando a percentagem de área por intervalo de ICR na BAI e na BAR no intervalo altimétrico de ocorrência da Superfície Alto Iguaçu, e quantidade de feições cársticas ocorrentes em cada intervalo de rugosidade concentrada na BAR.

Na sub-bacia de Bacaetava a distribuição de área nos intervalos de baixa rugosidade é mais anisotrópico, acompanhando a tendência observada na BAR, de acréscimo de área do primeiro para o segundo intervalo. Já entre o segundo e o quarto intervalo observa-se a tendência de diminuição verificada na BAI e entre o quarto e o quinto intervalo nota-se um considerável aumento no percentual de área (FIGURA 49).

Os valores de ICR, obtidos (através do cálculo do Índice de Rugosidade Concentrada (ICR)), refletem a relação entre os processos erosivos e as características litoestruturais das áreas de ocorrência de metadolomitos de cada sub-bacia, sintetizando a relação entre variáveis geológicas e geomorfológicas.

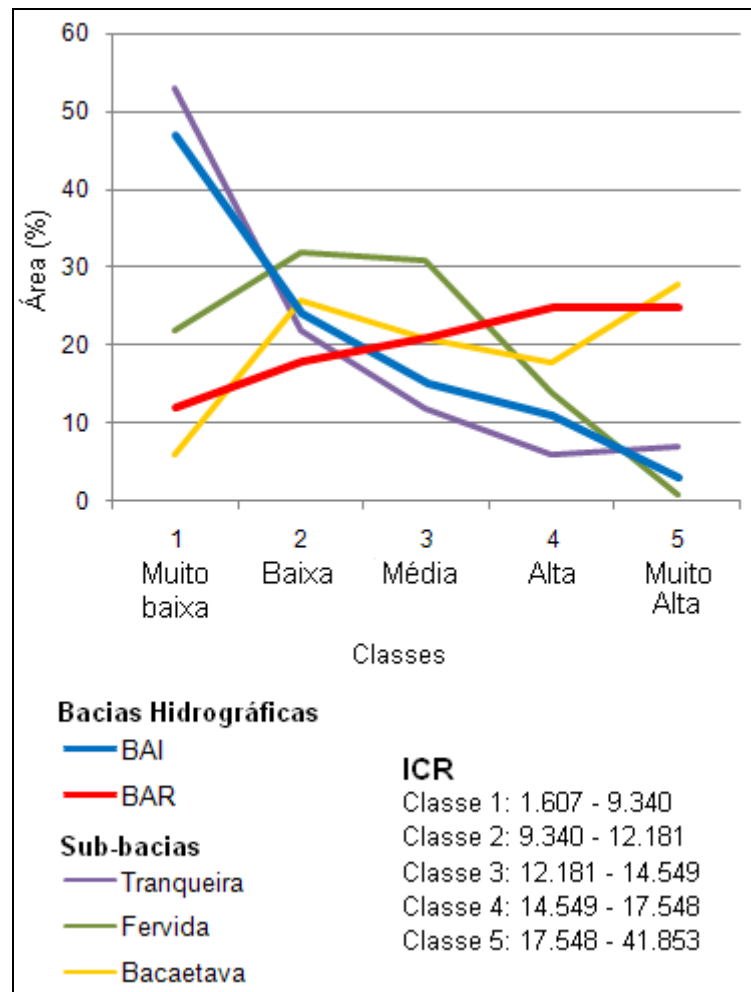


FIGURA 49 - Gráfico e TABELA da percentagem de área por intervalo de rugosidade concentrada da BAI, da BAR e das sub-bacias estudadas.

Entre elas destacam-se: a disposição litológica, a relação de paralelismo ou interseção dos canais fluviais com os diques e faixas quartzíticas, as estruturas geológicas e a relação com as drenagens, a declividade e a ocorrência de faixas altimétricas com maior ou menor expressividade.

O nível de exposição dos condutos cársticos em zona vadosa, que determina a existência de feições endocársticas acessíveis (cavernas, protocavernas e abismos), tem relação direta com a morfologia do relevo, na FIGURA 18, observa-se a tendência de ocorrência de cavernas e abismos nas regiões com índices de ICR mais elevados (FIGURA 50).

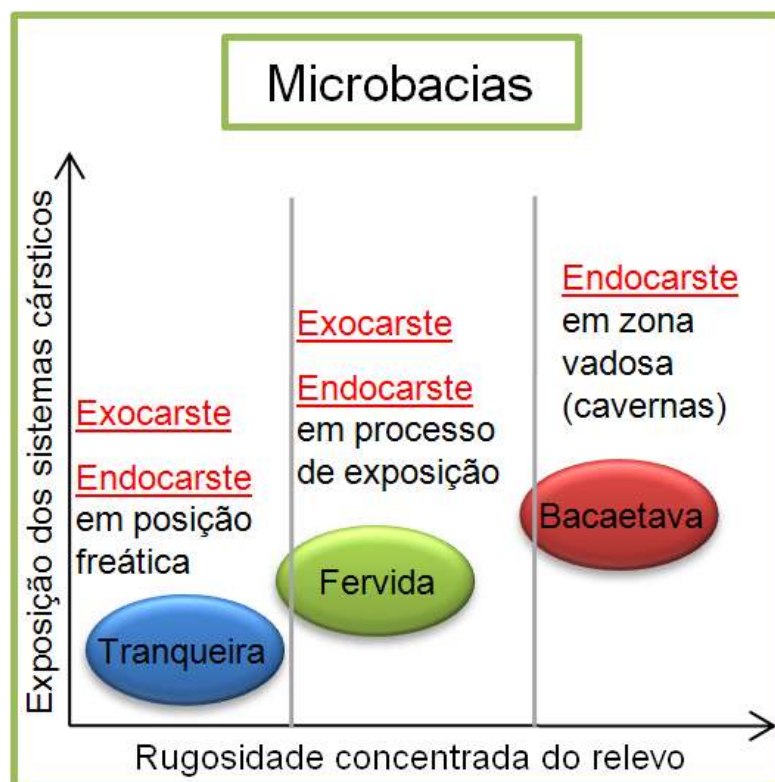


FIGURA 50 - Gráficos mostrando a relação entre os valores de ICR e o nível de exposição dos sistemas cársticos nas sub-bacias estudadas.

8.3 Variável Tempo

A abertura do Vale do Rio Ribeira no Mioceno Inferior permitiu as condições necessárias para o avanço das cabeceiras de drenagens, e a consequente captura de áreas inseridas em outros sistemas hidrográficos.

Esta erosão remontante das cabeceiras de drenagem truncou sistemas cársticos com evolução geológico/geomorfológica comum, em períodos diferentes, haja vista a compartimentação geológica em células cársticas. Neste modelo evolutivo áreas que hospedam aquíferos cársticos na BAI, possuem seus correspondentes dismantelados ou em fase de dismantelamento na BAR.

Outra implicação nos sistemas cársticos deste dismantelamento e relativo “esvaziamento dos sistemas aquíferos”, é o aporte hídrico inserido na rede fluvial, que somado às alterações paleoclimáticas apontadas por Bigarella (1994), podem alternar períodos de diminuição ou aumento da quantidade de água infiltrada nas áreas a jusante, afetando os processos de carstificação.

A sub-bacia de Fervida possui como características que denotam sua

inserção recente na BAR, a presença de remanescentes geomorfológicos descritos por Canali (1980) como “colos elevados” (*wind-gaps*), que testemunham a erosão de cabeceira e reversões de drenagens da BAI para a BAR (FIGURA 51), amplos vales secos no alto curso e sua morfologia. Esta captura implicou na mudança do regime erosivo, impondo sobre o carste preteritamente desenvolvido sob o regime mais ameno da BAI, uma dinâmica hidrogeomorfológica mais pronunciada.

O avanço da erosão remontante sobre rochas metadolomíticas proporciona uma paisagem que denota um estágio intermediário de exposição do sistema cárstico da sub-bacia de Fervida. Neste contexto a incisão vertical por vezes trunca os condutos cársticos e/ou auxilia que águas sobre pressão abram caminho na cobertura de inconsolidados, possibilitando o surgimento de protocavernas. Segundo Hindi (1997), há em Fervida cerca de 20 fontes cársticas, sendo 12 descritas como “ferventes” e 8 como de “fraturas”, todas com controle estrutural dado por diques de diabásio.

A existência das fontes cársticas artesianas deve-se ao fato de o ponto de emergência estar abaixo da superfície potenciométrica virtual, o que permite um aparente “esvaziamento” do aquífero cárstico de Fervida.

Respeitada as características estruturais de cada sub-bacia, e a evolução comum até a abertura do Vale do Rio Ribeira no Mioceno inferior, observa-se três estágios de exposição dos sistemas cársticos (anexo 1 e FIGURA 50).

- a) O primeiro na sub-bacia de Tranqueira e no alto curso de Bacaetava, onde os sistemas cársticos estão em equilíbrio com a paisagem, ocorrendo feições exocársticas em posição vadosa e endocársticas em posição freática.
- b) O segundo é verificado na sub-bacia de Fervida, onde coexistem recorrentes exposições de condutos cársticos (protocavernas), feições exocársticas e endocársticas em zona saturada, fato diretamente ligado à captura recente desta para o sistema hidrográfico do Rio Ribeira. Este estágio é verificado também no médio curso da sub-bacia do Rio Bacaetava, onde há a coexistência de cavernas e feições exocársticas em superfície.

c) O terceiro estágio é verificado na sub-bacia do Rio Bacaetava, onde a alta rugosidade concentrada do relevo condiciona a exposição em zona vadosa do endocarste que preteritamente se encontrava em posição freática, principalmente no baixo e médio curso, permitindo a existência de salões em diferentes níveis, desconectados da rede hidrográfica atual.



FIGURA 51 - Remanescente geomórfico (*Wind-gaps*), Reparar a discordância com a vertente e a presença de paleosolo.

Pode-se inferir que as duas cavernas localizadas no limite do baixo com o médio curso, próximas às primeiras barreiras litoestruturais formadas pelos diques de diabásio, onde o relevo é menos rugoso e apresenta declividades inferiores a 15%, são as cavernas mais novas da área estudada, resultantes da exposição de parte do sistema aquífero existente no médio curso.

As exposições em zona vadosa de carstes antes em ambiente saturado refletem uma fase de desmantelamento do aquífero cárstico, decorrente de um novo ciclo erosivo imposto pela abertura do Vale do Ribeira.

8.4 Condicionantes superficiais (epigênicos)

Na área estudada os metadolomitos pertencem a um mesmo contexto climático e geológico, o que proporciona rocha solúvel e disponibilidade hídrica em toda a área, no entanto, a carstificação não ocorre de forma generalizada, e sim concentrada em intervalos altimétricos específicos, com tipos de feições características para cada tipo de relevo.

Silva e Oka-Fiori (1994), apontam para a subordinação da fisiografia da região do carste do município de Almirante Tamandaré, às características litoestruturais do Grupo Açungui, e ressaltam o fraturamento tectônico e o metamorfismo de contato associado a intrusões de diques de diabásio como áreas de forte atuação dos processos de dissolução. Também o clima tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, é ressaltado como sendo fator propiciador de um carste com grande quantidade de feições exocársticas, considerado pelos autores como típicos de climas úmidos.

A geologia e a o clima abordado por Silva e Oka-Fiori (1994), são duas variáveis importantes para a carstificação, porém não reúnem as condições necessárias para o desenvolvimento da espeleogênese, nem para a determinação do tipo de feição cárstica ocorrente. Em especial a instauração das condições climáticas propiciadas pelo clima tipo Cfb, que expressa no tempo geológico condições muito recentes.

A existência de um mesmo contexto climático na área estudada permitiu certa homogeneidade nos processos erosivos que atuaram na evolução das paleosuperfícies identificadas na área de estudo. Conforme pode ser observado no QUADRO 1, e na FIGURA 5, a evolução geológico/geomorfológica principalmente a partir do final do Cretáceo, permitiu a elaboração de duas Paleosuperfícies de erosão/aplainamento na região.

Neste ambiente geomorfológico, geológico e paleoclimático comum, foram identificadas por Rebelo *et al* (2007), três fases diferentes de carstificação, atribuídas à evolução do modelado do relevo derivada da elaboração e erosão das superfícies do “*Puruña*”, “*Alto Iguaçu*”, e da “*abertura do Vale do Ribeira*”. Neste modelo, a configuração do relevo seria o fator determinante na formação e desenvolvimento dos sistemas cársticos, uma vez que possibilita maior eficiência dos processos de carstificação, devido ao aplainamento do relevo.

As faixas altimétricas de ocorrência das feições cársticas observadas nas sub-bacias estudadas, apontam para a validade do modelo proposto por Rebelo *et al* (2007), pois, há o predomínio de diferentes feições cársticas associadas aos intervalos altimétricos de ocorrência de cada paleosuperfície.

Em cotas altimétricas superiores a 1035m, são normalmente encontradas feições cársticas típicas de paleocarstes, associadas ao evento de carstificação derivado da elaboração da Superfície do *Puruña*. Já no intervalo altimétrico entre 945m e 1035m, são observadas as feições exocársticas, vinculadas à Superfície do Alto Iguaçu.

A atuação erosiva proporcionada pela “*Abertura do Vale do Ribeira*” requer uma abordagem diferenciada, pois, conforme anteriormente observado, é verificada somente na bacia do Alto Ribeira, o que expõe o carste de mesma idade do ocorrente na bacia do Alto Iguaçu a uma dinâmica erosiva mais pronunciada.

A relação entre feições cársticas e os eventos de aplainamento regional permite afirmar que para a área de estudo os desdobramentos espaços-temporais do relevo dão o arranjo espacial necessário para que outros subsistemas naturais (clima, geologia, cobertura vegetal entre outros), se interconectem e possibilitem o desenvolvimento do processo de carstificação.

8.5 Possível atuação hipogênica

Considerar as formas e evolução do relevo como determinantes na formação e desenvolvimento dos sistemas cársticos epigênicos, é pertinente para o desenvolvimento deste processo a partir dos agentes meteóricos. No entanto, a

carstificação se dá também em profundidade, e em alguns casos sem aparente interferência direta dos controles superficiais na amplitude e direção dos condutos.

Os poços perfurados pela SANEPAR nas sub-bacias de Tranqueira, Fervida e Tumiri (coalescente à sub-bacia de Fervida), com profundidade variando entre aproximadamente 15m e 156m, possuem descrições litológicas que relatam a existência de condutos cársticos descritos como “cavernas”, com amplitudes de até 8m na sub-bacia de Tranqueira (poço 17) e com até 20m (poço 9) na sub-bacia de Fervida. A profundidade média de interceptação dos primeiros condutos cársticos é de 25m em Tranqueira e 24m em Fervida (a partir da cota de perfuração dos poços), e a profundidade média máxima dos condutos de 35m em Tranqueira e 32m em Fervida. Somente na sub-bacia de Fervida há descrição de condutos cársticos abaixo do nível de base da sub-bacia, de 915m de altitude, com condutos na cota altimétrica de 909m.

Os processos que determinam a gênese e o desenvolvimento de condutos cársticos em profundidade na área de estudo, certamente estão associados aos fluxos hídricos epigênicos, porém, pode-se também admitir a atuação de controles hipogênicos, pois conforme aponta Hindi (1999) e Lisboa (1997), ocorrem fluxos hídricos subterrâneos ascendentes, em zonas semiconfinadas, e por artesianismo, que podem contribuir para a carstificação em profundidade. O fluxo hídrico ascendente devido ao semiconfinamento do sistema aquífero na sub-bacia do Rio Tumiri, descrito por Hindi (1999) é ilustrado na FIGURA 52.

Lisboa (1997) descreve o fluxo hídrico ascendente por artesianismo na região do compartimento São Miguel à jusante da sub-bacia de Tranqueira, derivado da barreira hidrogeológica imposta pelos diques de diabásio.

Lladó (1970), com base em Maucci (1952) admite a existência de fluxos ascendentes promotores da abertura de condutos cársticos por “*erosão inversa*”. Tal fenômeno resulta da circulação de águas em ambientes confinados, que por pressão hidrostática possuem energia suficiente para ascender e gerar abertura de cavidades sem explicação satisfatória por erosão “normal” típicas de ambientes com circulação hídrica livre (carste epigênico).

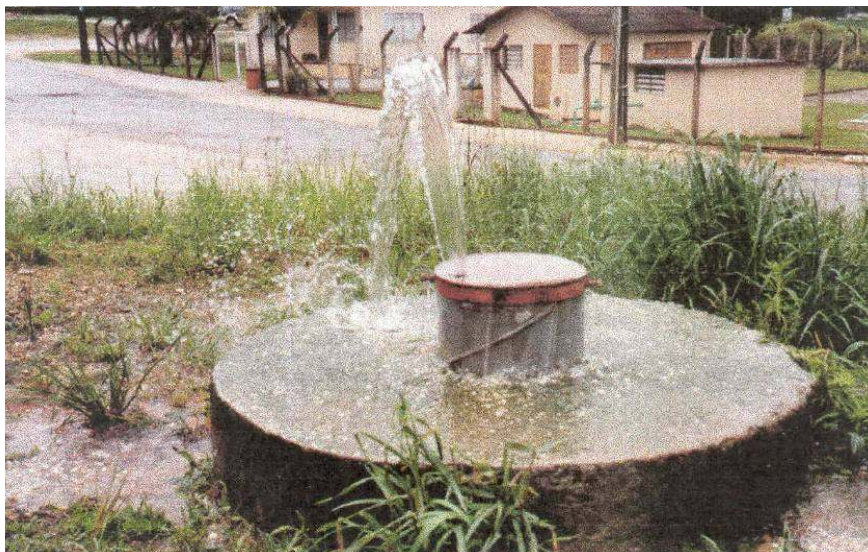


FIGURA 52 - Poço P-14 com fluxo hídrico ascendente devido ao nível estático superior à superfície do terreno (adaptado de HINDI, 1999).

Na mesma linha de Lladó (1970), Klimchouk (2007) considera a existência de processos hipogênicos, independente da origem, composição química e temperatura dos fluídos. Ou seja, muitas cavidades existentes em subsuperfície e superfície, podem ter origem intrinsecamente ligada a fluídos de qualquer natureza, que por artesianismo e/ou confinamento, possuem energia suficiente para ascender e proporcionar carstificação em profundidade, sem possuir relação alguma com os controles superficiais. Neste modelo, importante papel desempenham as estruturas tectônicas, consideradas as zonas preferenciais para a abertura de cavidades cársticas.

Lladó (1970) e Klimchouk (2007) concordam ao admitirem a tendência natural de desaparecimento da carstificação hipogênica devido sua exposição paulatina à ambientes de desenvolvimento de carstes epigênicos (meteóricos). Klimchouk (2007) reforça esta teoria ao descrever a coexistência de feições cársticas inicialmente de natureza exclusivamente hipogênica, que devido à evolução do relevo, e/ou seu estágio evolutivo deixou de possuir fluxo ascendente, derivado de sua natureza pretérita confinada, semiconfinada ou artesianas, passando a possuir controles unicamente superficiais.

Com base nos dados deste estudo, à luz dos trabalhos de Lladó (1970), Klimchouk (2007), e trabalhos de Rebelo *et al* (2007), pode-se admitir a coexistência de carstificação epigênica e hipogênica na formação e desenvolvimento do carste

subsuperficial ocorrente na área de estudo, especialmente nas sub-bacias de Tranqueira e Fervida. Já na sub-bacia de Bacaetava, pode-se inferir que haja ambos os fenômenos nas células cársticas preservadas no médio e alto curso. No entanto, na área de ocorrência de cavernas, no baixo curso, parece haver somente a existência de processos epigênicos. Todavia, a existência pretérita de carstificação hipogênica pode ter sido responsável pela abertura dos condutos, que com sua conexão com a superfície, passaram a ter controles epigênicos superficiais, sendo expostos e ampliados verticalmente, formando cavernas.

Já a existência de fontes cársticas do tipo “*fervida*”, na sub-bacia do Rio Fervida denota a existência de um estágio intermediário, entre a atuação hipogênica e epigênica, onde os processos geológicos e geomorfológicos parecem estar naturalmente evoluindo para uma atuação predominantemente epigênica (LLADÓ, 1970 e KLIMCHOUK, 2007). Tal situação seria a fase inicial de abertura de cavernas, onde o tamanho dos condutos, ainda incipiente, não permite a penetração humana, sendo denominados na literatura de protocavernas.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

9.1 Considerações finais

Nesse estudo, o ambiente geológico da Formação Capiiru do Grupo Açungui e as características climáticas atuais e pretéritas foram consideradas constantes nas sub-bacias estudadas, haja vista a pequena superfície abrangida. Já a evolução geomorfológica foi considerada semelhante em toda a área até o evento condicionante da abertura do vale do Rio Ribeira, no Mioceno Inferior, a partir do qual, a erosão remontante do sistema hidrográfico do Rio Ribeira foi responsável pela captura e exposição dos metadolomitos da Formação Capiiru, outrora drenados pela BAI, a um regime erosivo mais acentuado, afetando os sistemas cársticos existentes na Paleosuperfície do Alto Iguaçu.

Nesse modelo os sistemas cársticos com gênese e evolução correlata à paleosuperfície do Puruña e Alto Iguaçu estão presentes em ambas as bacias. Os primeiros são representados por feições de paleocarstes, desconectados da rede hidrográfica atual. Os correlatos à Superfície do Alto Iguaçu são definidos por feições exocársticas (superficiais) e endocársticas em ambiente saturado (Sistema Aquífero Cárstico da RMC) na BAI. Já os sistemas cársticos correlatos à Superfície Alto Iguaçu submetidos ao regime erosivo mais intensos na BAR, são caracterizados por feições exocársticas e endocársticas em ambiente saturado e vadoso (cavernas e abismos).

Ou seja, foi possível verificar que os processos regionais de erosão e aplainamento afetaram áreas consideráveis do Paraná e permitiram a elaboração de feições cársticas características, hoje dispostas em diferentes maneiras, formas e intervalos altimétricos na área de estudo, o que corrobora o modelo proposto por Rebelo (2007). Isto deve-se aos controles litoestruturais, em escala local, e ao regime erosivo que afetou cada sub-bacia, proporcionando diferentes formas e níveis de exposição dos sistemas cársticos.

Os controles litoestruturais de cada sub-bacia são estabelecidos principalmente por faixas metassedimentares e diques de diabásio que funcionam

como níveis de base locais, preservando o maciço metadolomítico da incisão vertical das drenagens. No entanto, a preservação dos maciços metadolomíticos é eficiente somente quando as drenagens possuem seus cursos perpendiculares aos níveis de base locais, já quando os cursos são paralelos à rocha ou estrutura que condiciona os níveis de base locais, ocorre o favorecimento do entalhe dos canais sobre os metadolomitos e a exposição mais pronunciada dos sistemas cársticos.

No caso dos diques de diabásio, além de exercerem controles locais sobre o nível de exposição do aparelho cárstico regional, também funcionam como zonas preferenciais de instauração de drenagens quando intrudidos em faixas metassedimentares, o que possibilita a inserção de sistemas cársticos a dinâmicas erosivas diferenciadas, atuando como um importante agente local e regional na evolução dos sistemas cársticos.

Igualmente aos diques, o complexo sistema de falhas e fraturas exerce controle em escala local e regional, funcionando desde zona preferencial de abertura de condutos a áreas preferenciais de instauração do sistema de drenagem, o que influi diretamente na favorabilidade ou não da incisão das drenagens nos metadolomitos.

Com a análise morfométrica do relevo na escala de sub-bacias foram identificados, com base nas características de declividade, hipsométricas e, sobretudo do Índice de Rugosidade Concentrada (ICR) do relevo, três estágios erosivos do relevo, aos quais estão associados sistemas cársticos com diferentes graus de exposição, organização espacial e forma.

O primeiro é identificado na sub-bacia de Tranqueira e no alto curso de Bacaetava, onde se verifica um relativo (equilíbrio) entre erosão e as superfícies de aplainamento estabelecidas regionalmente, e permite que os sistemas cársticos estejam em equilíbrio com a paisagem, com feições exocársticas em posição vadosa e endocársticas em posição freática, condições propícias para a formação de aquífero cárstico.

O segundo estágio é verificado na sub-bacia de Fervida, onde coexistem feições exocársticas, exposições de condutos cársticos (protocavernas) e feições endocársticas em zona saturada, fato diretamente ligado à captura recente desta para o sistema hidrográfico do Rio Ribeira. Este estágio é verificado também no

médio curso da sub-bacia do Rio Bacaetava, onde há a coexistência de cavernas e feições exocársticas em superfície, sendo as cavernas localizadas nas regiões com maior rugosidade concentrada, próximas as barreiras litoestruturais impostas pelos diques de diabásio, na região limítrofe entre o médio e o baixo curso.

O terceiro é verificado na sub-bacia do Rio Bacaetava, onde, principalmente os valores de ICR entre 4 e 5 indicam a exposição, em zona vadosa do endocarste que preteritamente se encontrava em posição freática, principalmente no baixo e médio curso, permitindo a existência de salões em diferentes níveis, desconectados da rede hidrográfica atual, a exemplo da Caverna de Bacaetava. Tais condições refletem uma fase de desmantelamento do aquífero cárstico, consequência do novo ciclo erosivo vinculado à abertura do Vale do Ribeira.

Há, portanto três estágios evolutivos de relevo aos quais se associam sistemas cársticos característicos nas sub-bacias estudadas, fato também observado na sub-bacia de Bacaetava, onde os três compartimentos principais de relevo possuem feições cársticas com diferentes modos de ocorrência, nível de exposição e organização espacial.

9.2 Recomendações

Devido à grande importância econômica e natural das áreas carbonáticas carstificadas da RMC, sugere-se a aplicação de estudos com os seguintes enfoques:

- Aplicação de geoquímica isotópica para um melhor entendimento da evolução e das idades dos eventos geomorfológicos e suas influências no fenômeno de carstificação.
- Levantamento mais sistemático de intervalos altimétricos entre o desenvolvimento de paleosuperfícies, a fim de localizar áreas com carstificação incipiente, mais adequadas à exploração de calcário.
- Estudos com enfoque na atuação dos processos hipogênicos na gênese do carste da RMC.

Para a exploração mineral das áreas carbonáticas com carstificação correlata a elaboração da Paleosuperfície do Alto Iguaçu na RMC, recomenda-se o zoneamento a partir do estudo das características geomorfológicas regionais, pois deste modo pode-se classificar áreas propícias à exploração de metadolomitos como minério ou como hospedeiros de sistemas aquíferos. Para tanto, sugere-se a utilização do ICR proposto por Sampaio (2008), que neste estudo mostrou-se eficaz na sintetização das características geológicas e geomorfológicas que determinam o grau de exposição dos sistemas cársticos. A FIGURA 53 modela com base na no ICR do relevo, o tipo de exploração mais adequada para cada sub-bacia estudada.

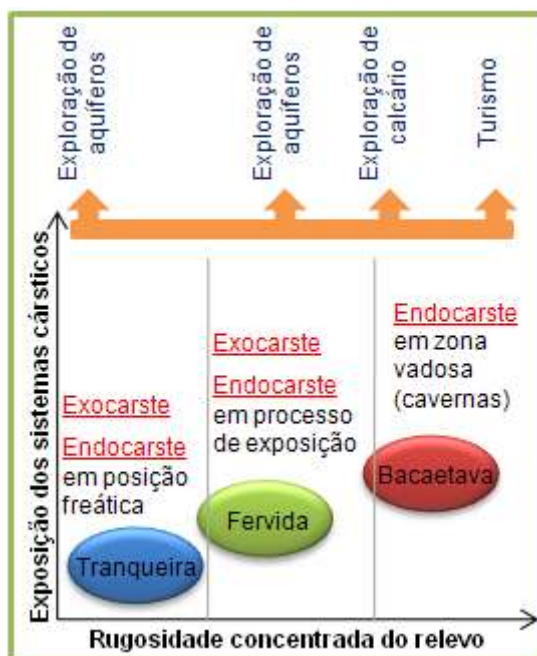


FIGURA 53 - Modelo demonstrando o tipo de exploração mais adequado para o carste das sub-bacias estudadas.

REFERÊNCIAS

- AB´SABER A.N. e BIGARELLA J.J. (1961). **Superfícies aplainadas do Primeiro Planalto do Paraná**. Bol. Par. Geografia, 4 e 5:116-125.
- ADAM, E. R. (2005) **Os metadolomitos da Região do Tigre-Pr: Características Geológicas e Tecnológicas**. Dissertação de Mestrado em Geol. Explor. SCT – UFPR, 177 p.
- AULER A. S., *et al.* (2001) **As grandes cavernas do Brasil**. Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 227p.
- BAHNIUK, A. M. (2007) **Controles geomorfológicos da carstificação em metadolomitos da Formação Capiru – Neoproterozóico, Região Metropolitana de Curitiba, Paraná**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, UFPR, 162p.
- BIGARELLA, J. J. (1953) **Estudos Preliminares na Série Açungui III – Rochas Calcárias da Faixa Central e sua Classificação – Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. VIII, art. 21, p. 473-502 – Inst. Biol. e Pesq. Tecn. Curitiba-PR
- BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. (1956) **Estudos Preliminares na Série Açungui. V – Estruturas Organógenas nos Meta-dolomitos da Formação Capirú (PR)**. v. 6-7. p. 317-322. Curitiba.
- BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R.; PINTO, V.M. (1967) **Geologia do Pré-Devoniano e Intrusivas Subsequentes da Porção Oriental do Estado do Paraná**. Bol. Paran. Geoc. v. 23-25. 347 p. Curitiba.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. (1994) **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: UFSC, v. 1. 425 p.
- BITTENCOURT, C. (2008) **Carstificação Hipogênica e Epigênica – Influências Sobre a exploração de minério de zinco da Mina de Zinco de Vazante – MG**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, UFPR, 110p.
- BONACIM, E. (1996) **Dinâmica do Sistema Hidrogeológico Cárstico na Área de Tranqueira – Região Metropolitana de Curitiba**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, UFPR, 162p.
- CANALI, N, E. (1980) **Contribuição ao estudo da geomorfologia da área de Colombo-PR**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, UFPR 96p.
- DE BIASI, M. (1992) **Carta Clinográfica: métodos de representação e sua confecção**. Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo, n. 6, p. 45 – 60.
- DERBY, O. (1878) **Geologia da Região Diamantífera da Província do Paraná no Brasil**. Arch. Mus. Nac. v. 3. p. 89-96. Rio de Janeiro.
- EBERT, H.; BROCHINI, M.F.; MARINI, O.J. (1971) **Observação sobre os Gnaisses da Formação Setuva, Estado do Paraná**. In: Cong. Bras. Geol. 25. São Paulo. 1971. Bol. Esp. São Paulo. SBG. 1971. n.k. p. 185-186.

FASBINDER, E., (1996) - **A unidade Água Clara no contexto do Grupo Açungui: um modelo transpressivo de colisão oblíqua no Neoproterozóico paranaense**. Inst. De Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 207p

FIORI, A. P.; CAMARGO, E.C.; MONASTIER, M.S.; LIMA, R.E. (1984) **Lineamentos Tectônicos e Possíveis Mineralizações Associadas no Pré-Cambriano Paranaense**. Texto Final. Curitiba, Convênio UFPR/MINEROPAR, 2v., v.I.

FIORI, A.P., (1990) **Tectônica e Estratigrafia do Grupo Açungui a Norte de Curitiba. São Paulo**. 261p. Ilust.

FIORI, A.P. (1992) **Tectônica e Estratigrafia do Grupo Açungui – PR**. Boletim IG-USP, Série Científica, 23:55-74.

FIORI, A.P., (1994) **Evolução geológica da bacia Açungui**. Boletim Paranaense de Geologia, 42: 1-27

FLORENZANO, T. G. (2008). **Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo, Oficina de Textos. 318p.

FLÜGEL R. A. (2004) **Microfacies of carbonate rocks, analysis interpretation and application**. Berlin: Springer. 976p.

FORD and WILLIAMS, (1989). **Karst geomorphology and hidrology**. Chapman e Hall, 601p.

FUCK, R. A.; MARINI, O. J.; TREIN, E.; MURATORI, A. (1971) **Geologia do Leste Paranaense**. An. XXV Cong. Bras. Geol. p. 122-130. São Paulo.

GEEP-Açungui – Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná. (2002) **Cadastro das Cavidades Naturais do Estado do Paraná**. Org. Luis Fernando Silva da Rocha.

GUIMARÃES, S, B. (2005), **O Calcário como minério na Formação Capiru do Grupo Açungui: Estudo Analítico para a Região Metropolitana de Curitiba**. (tese de Doutorado –UFPR), 136p.

HINDI, E. C. (1999) **Caracterização Hidroquímica e Hidrogeológica das Fontes Cársticas das Bacias dos Rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e das Onças - Colombo, PR**. Dissertação de Mestrado – Curitiba , UFPR, 122 p.

HOBSON, R. D. (1972) **Surface roughness in topography: quantitative approach**. in: Chorley, R.J., 1972. Spatial analysis in geomorphology, 225-245.

JICA – Japan International Cooperation Agency. (1995). **The master plan study on the utilization of water resources in Paraná State in the Federative Republic of Brazil**. Tokyo,

KARMANN I. (1994) **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado - São Paulo. USP, 228 p.

KLIMCHOUK, A. B. (2007) **Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective**. Special Paper no.1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, 106 pp.

- LLADÓ, N. L. (1970) **Fundamentos de hidrogeologia cárstica**. Madrid, Ed. Blume, 271p.
- LEPREVOST, A. (1946) Análises de Alguns Calcários Paranaenses. In: Arq. Biol. Técn., Curitiba.
- LISBOA, A. A. BONACIM, E. (1995) In: **Projeto Calcário Distrito Mineiro Capiru-Mineropar S.A.**, Curitiba, 123p.
- LISBOA, A. A. (1997) **Proposta de Metodologia para Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Cárstico, Compartimento de São Miguel**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, UFPR, 127 p.
- MARINI, O.J. (1970) **Geologia da Folha de Rio Branco do Sul – PR**. Tese da Fac. Filos. Cie. e Letras, Rio Claro – SP, inédito, 190 p.
- MINEROPAR S. A. (2006). **Mapa geológico do Estado do Paraná**. Curitiba, Escala 1: 250.000. Curitiba-PR.
- MINEROPAR S. A. (2006). **Mapa geomorfológico do Estado do Paraná**. Curitiba, Escala 1: 250.000. Curitiba-PR.
- OLIVEIRA, E.P. (1927) **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná** - Escala 1:1.000.000. Serv. Geol. Miner. do Brasil. Mon. VI. Rio de Janeiro.
- PALMER, A. N. (1991) **Origin and morphology of limenstone caves**. Geol. Soc. Am. Bull. 103: 1 – 21.
- PILÓ, L. B (2000). **Geomorfología cárstica**. In: Revista Brasileira de Geomorfologia. Minas Gerais, v. 1, n. 1, p. 88-102.
- POLIDORO, G. F. B. (2005). **Karst na bacia do Alto Iguaçu, Região Metropolitana de Curitiba: Aspectos geológicos para a gestão da ocupação do solo e do uso do aquífero na sub-bacia hidrográfica do Rio Pacatuba em Almirante Tamandaré-PR**. Curitiba, (Dissertação de Mestrado - UFPR). 122 pp.
- POPP, J.H.; ANGULO, R.; BIGARELLA, J.J. (1980) **Geologia**. In: Bigarella, Passos, Popp, Angulo - **Recursos Minerais. Folha Ouro Fino**. COMEC. p. 22-26. Curitiba.
- PRODECAL (1997) - **Programa de desenvolvimento da indústria do calcário e da cal no Estado do Paraná** - Câmara Setorial Mineral do Estado do Paraná, Minerais do Paraná S.A., Sindicato da Indústria de Extração de Metadolomitos, Calcários e Pedreiras do Paraná, Sindicato das Indústrias de Cal do Paraná e SEBRAE/PR, Curitiba, 30 p.
- REBELO, A .M. A, REIS NETO, J. M e GUIMARÃES, S. B. (2002) - **Controle controles Geomorfológicos na Gênese das Cavernas em Calcários na Bacia Açungui-Ribeira – Estado do Paraná** – Sessão Temática: Pedologia e Geomorfologia – XLI Cong. Bras. de Geol. – J. Pessoa –PB.
- REBELO, A. M. A., GUIMARÃES, S. B., REIS NETO, J. M., (2003) **A exploração mineral e o desenvolvimento paranaense: o setor de calcário na região Metropolitana de Curitiba**. Bol. Paranaense de Geociências, nº 53, Ed. UFPR, p. 13-26.
- REBELO, A. M .A., REIS NETO, J. M., GUIMARÃES, S. B., (2004) **Importância Estratégica e Entraves na Modernização da Exploração de na Região Metropolitana de Curitiba**. XLII Cong. Bras. de Geolog. – Araxá – MG- S4:212p.

Rebelo, A. M. A., Reis Neto, J. M., Bahniuk, A. M., Nascimento, E. R.; Eeva, S. T. (2007) **Sistemas Cársticos em Rochas Metadolomíticas do Grupo Açungui e Superfícies de Erosão na Região Leste do Estado do Paraná, Brasil**. Submetido à publicação na Revista Paranaense de Geociências.

RIFFEL, S. B. (2005) **Curva Hipsométrica no mapeamento de paleosuperfícies: Abordagem Quantitativa**. Dissertação de Mestrado – Curitiba, UFPR, 76p.

SAMPAIO, T. V. M. (2008). **Parâmetros morfométricos para Mapeamento da rede de rios - uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente -ES**. 2008. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais.

SANEPAR-Companhia de Saneamento do Paraná SA (2006) Fornecimento de dados sobre o **“Aquífero Carste da Região Metropolitana de Curitiba”** (mapas geológico e de relevo 1:25.000 e dados de poços), Curitiba (PR).

SESSOGOLO, G. C.; ROCHA, L. F. S.; LIMA, F. F. (2006). **Conhecendo Cavernas: Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba: GEEP Açungui. 120 p.

SILVA, R. da (1991) **Identificação das formas cársticas através de análises geomorfológicas das quadriculas A-90, A-100, A-101, da Região Metropolitana de Curitiba**. Monografia de graduação apresentada ao Departamento de Geografia /UFPR. P.68, Curitiba.

SILVA, R; OKA-FIORI, C. (1996) **Estudo das formas cársticas como base para o gerenciamento do uso do manancial subterrâneo na região de Almirante Tamandaré e Rio Branco do Sul – PR**. Bol. Paranaense de Geociências, nº44, Ed. UFPR, p. 59-66.

SIQUEIRA, R. B. L, (2001) - **Metadolomitos da Região de Morro Grande -Município de Colombo-PR**. Dissert. de Mestrado em Geol. Explor. SCT – UFPR, 205 p.

SOARES, P.C., REIS NETO, J.M. (1987) **Sequências Tectono-sedimentares e Tectônica Deformadora no Centro-oeste do Escudo Paranaense**. In: Simp. Sul-Bras. Geol. 3. Curitiba. 1987. Atas Curitiba. SBG. v.2, p.743-771.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R. e TAIOLI, F. (2001). **Decifrando a terra**. São Paulo, Oficina de Textos. 568p.

ANEXO

	Rugosidade do Relevo		
Sub-bacia	Tranqueira	Fervida	Bacaetava
Elementos litoestruturais	Falhas de Cavalgamento: metassedimentos com direções N60-80°E, N60-70°W e EW. Falhas e fraturas: Direções N10-20°E, N40-60°W, afetando todas as litologias. Diques de diabásio: direção N40-60°W, afetando todas as litologias.	Falhas de Cavalgamento: metassedimentos com direções N20-40°E. Falhas e fraturas: Direções N40-55°E, N50-60°W, afetando todas as litologias. Diques de diabásio: direção N40-60°W, afetando todas as litologias.	Falhas de Cavalgamento: Metassedimentos com direções N70-80°E e EW. Falhas e fraturas: Direções N20-30°E, N30-50°W e EW, afetando todas as litologias. Diques de diabásio: direção N40-60°W, afetando todas as litologias.
Hipsometria (m)	Amplitude Altimétrica: 170m (955 a 1125m); Média altimétrica e desvio padrão: 1034m e 26m; Faixas hipsométricas mais Frequentes: 955-1000= 7,9% 1000- 1080= 89% 1080-1125= 3,1%	Amplitude altimétrica: 133m (916 a 1049m); Média altimétrica e desvio padrão: 974m e 20m. Faixas hipsométricas mais Frequentes: 916-940= 3,52% 940-1000= 86,62 % 1000- 1049= 9,86%	Amplitude altimétrica: de 227m, (893 a 1120m) Média altimétrica e desvio padrão: 1018m e 40m. Faixas hipsométricas mais Frequentes: 893-960= 7,28% 960-1080= 88,06% 1080- 1120= 4,66%
Declividade (%)	Intervalo de declividade x Percentagem de área < 5= 21% 5-12= 36% 12-30= 37,4% 30-45= 5% >45 = 0,6%	Intervalo de declividade x Percentagem de área < 5= 14,5% 5-12= 35,7% 12-30= 41% 30-45= 7,4% >45 = 1,4%	Intervalo de declividade x Percentagem de área < 5= 9% 5-12= 23% 12-30= 50% 30-45= 13% >45 = 5%
Hidrografia e Relevo	Superfície do Alto Iguaçu; drenagens com forte controle litoestrutural; níveis de base locais impostos por rochas metassedimentares e diques de diabásio; relevo plano a ondulado; nível de base regional controlado pelo rio Iguaçu.	Vale do Ribeira, drenagens com forte controle litoestrutural; níveis de base impostos por diques de diabásio e rochas metassedimentares; relevo plano a muito ondulado, em processo de rejuvenescimento por recente captura para a bacia hidrográfica do rio Ribeira, nível de base regional.	Vale do Ribeira, drenagens com forte controle litoestrutural. Pelo menos três compartimentos geomorfológicos distintos. Baixo curso com relevo bastante dissecado sem influência de níveis de base locais; médio e alto curso com barreiras formadas por diques de diabásio e rochas metassedimentares, preservando o relevo dos processos erosivos.
Rugosidade concentrada do Relevo	Os intervalos de rugosidade mais elevadas concentram-se nas áreas de contato com os quartzitos e diques de diabásio, nas vertentes dos altos topográfico. Já os metadolomitos em áreas rebaixadas possuem rugosidade incipiente.	Os intervalos de rugosidade mais elevadas concentram-se principalmente nas áreas próximas as cristas quartzíticas, sendo as áreas mais baixas com rugosidades mais amenas.	Os intervalos de maior rugosidade apresentam-se tanto em áreas próximas aos altos topográficos, quanto em metadolomitos nos baixos topográficos, (fundo de vales), especialmente na área de ocorrência de três das cinco cavernas ocorrentes nesta sub-bacia.
Feições cársticas predominantes	Exocársticas (dolinas, poljes, uvalas, etc.); endocársticas em posição freática, acessíveis por poços.	Exocársticas (dolinas, poljes, uvalas, etc.); recorrentes exposições de condutos (protocavernas) em zona vadosa; feições endocársticas em posição freática, acessíveis por poços.	Feições exocársticas (dolinas, poljes, uvalas, etc.) ocorrentes no alto e médio curso; endocársticas em posição vadosa no baixo e médio curso onde ocorrem 5 (cinco) cavernas.
	Grau de exposição dos sistemas cársticos		